ELETRÔNICA 2

© SENAI - PR, 2001

CÓDIGO DE CATÁLOGO : 1101B

Trabalho elaborado pela Diretoria de Educação e Tecnologia
do Departamento Regional do SENAI - PR , através do
LABTEC - Laboratório de Tecnologia Educacional.

Coordenação geral	Marco Antonio Areias Secco
Elaboração técnica	SENAI CIC/CETSAM

Equipe de editoração

Coordenação	Lucio Suckow
Diagramação	José Maria Gorosito
Ilustração	José Maria Gorosito
Revisão técnica	SENAI CIC/CETSAM
Capa	Ricardo Mueller de Oliveira

Referência Bibliográfica.
NIT - Núcleo de Informação Tecnológica
SENAI - DET - DR/PR

S474u SENAI - PR. DET
ELETRÔNICA 2
Curitiba, 2001, 304 p

CDU - 537

Direitos reservados ao

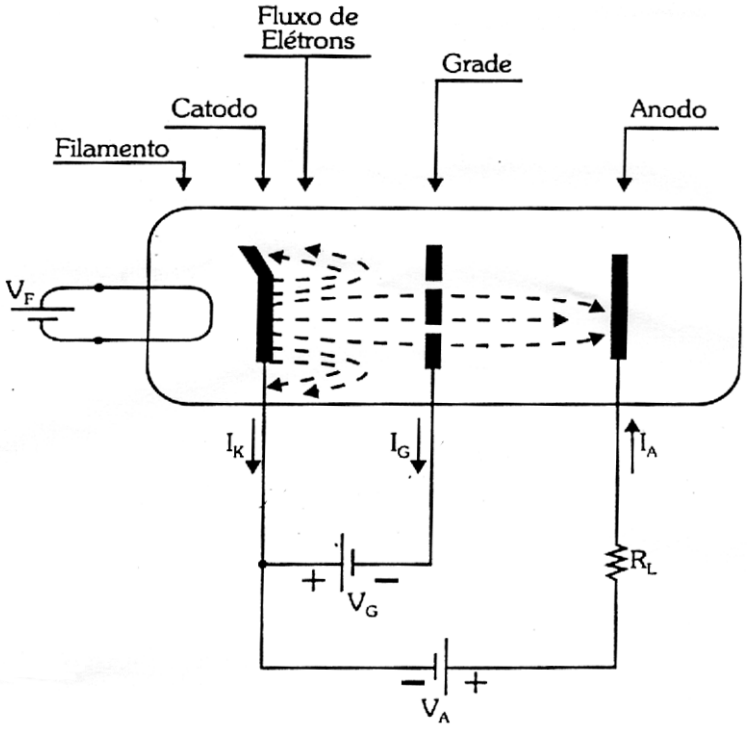
SENAI — Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Departamento Regional do Paraná
Avenida Cândido de Abreu, 200 - Centro Cívico
Telefone: (41) 350-7000
Telefax: (41) 350-7101
E-mail: senaidr@pr.senai.br
CEP 80530-902 — Curitiba - PR

SUMÁRIO

12 – Transistores Bipolares
13 – Aplicações Básicas dos Transistores
14 – O Transistor como comparador
15 – Fonte Regulada com comparador
16 – Multivibrador Biestável
17 – Multivibrador Monoestável
18 – Multivibrador Estável
19 – Transistor de efeito de campo de função JFET
20 – Mosfet
21 – Encapsulamento
22 – Noções Básicas sobre circuito integrado
23 – Circuitos Monoestáveis e Astáveis com C.I 555
24 – SCR
25 – TRIAC
26 – Dispositivos de Disparo
27 – Componentes e Circuitos Especiais de Disparo
28 – TCA
29 – Potência CA
30 – Circuito Impresso
31 – Identificação de Terminais e Teste de Dispositivos Semicondutores

TRANSISTORES BIPOLARES

A válvula foi apresentada por J. A. Fleming em 1904. Era uma válvula diodo. Em 1906, Lee de Forest acrescentou à válvula diodo um terceiro elemento chamado **grade**, que servia para **controlar** o fluxo de corrente entre o anodo e o **catodo**.



Válvula Triodo Polarizada

O potencial da **grade**, sendo negativo em relação ao cátodo, dificulta a passagem do fluxo de elétrons, **controlando** a corrente na carga R_L.

Assim, qualquer pequena variação de tensão de grade $\mathbf{V_G}$ provoca uma **pequena variação** na sua corrente $\mathbf{I_G}$, causando uma **grande variação** na corrente de anodo $\mathbf{I_A}$, sendo que a relação entre essas variações determina o **ganho** ou a **amplificação A** do triodo, ou seja:

$$A = \frac{\Delta I_A}{\Delta I_G}$$

Este **efeito amplificação** obtido pelo **controle** de corrente, era tudo o que a eletrônica precisava para desenvolver grandes projetos.

Nos anos seguintes, impulsionadas pelas indústrias de rádios e televisores, as válvulas sofreram um grande avanço. A produção aumentou explosivamente, havendo muito investimento em pesquisas. Com isso, surgiram o **tetrodo** (válvula com quatro elementos) e o **pentodo** (válvula com cinco elementos), melhorando o desempenho das mesmas. Dessas pesquisas, obtiveram-se também outros resultados importantes: projetos mais sofisticados, melhores técnicas de fabricação e miniaturização de dispositivos, aplicações em alta freqüência e alta potência, etc.

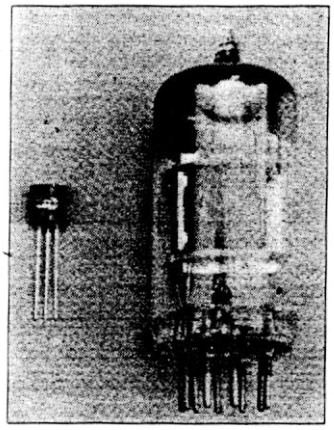
Curiosidade

Há alguns anos atrás, um avião soviético (da antiga URSS), caiu no Japão. Era um MIG-25, um dos mais sofisticados caças de combate da época. Houve toda uma movimentação política e diplomática entre o Japão, os EUA e a URSS. O que se diz, é que os EUA, com a ajuda do Japão, puderam investigar todos os elementos deste avião, inclusive sua eletrônica de bordo. Qual não foi a surpresa, quando descobriram que uma boa parte dos circuitos eram construídos com micro-válvulas.

A revolução – 23 de Dezembro de 1947

Nos laboratórios de pesquisas da indústria Bell Telephones, nos EUA, Walter Brattain e John Bardeen mostraram ao mundo um novo conceito em eletrônica: o **transistor bipolar** (condução nos dois sentidos) ou **transistor de junção**.

- Não precisava de filamento;
- Mais resistentes;
- Mais eficientes, pois dissipava menos potência;
- Não necessitava de tempo de aquecimento;
- Menores tensões de alimentação.



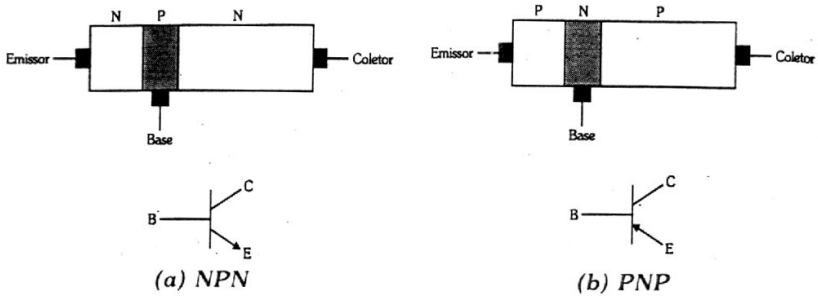
Vantagens Evidentes

Com todas vantagens, os transistores revolucionaram a tecnologia eletrônica, permitindo que hoje, com toda a gama de tipos e tecnologias de fabricação, possamos ver as maravilhas que eles fazem.

Um microprocessador (coração do computador) pode chegar a Ter um milhão ou mais de transistores em seus circuitos (todos montados numa única pastilha de silício de 25 mm²). Imagine um computador montado com válvulas!

O Transistor Bipolar

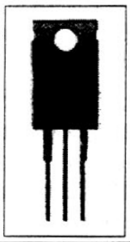
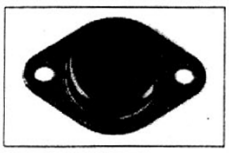
O princípio do transistor é também poder **controlar a corrente**. Ele é montado numa estrutura de cristais semicondutores, de modo a formar duas camadas de cristais do mesmo tipo intercaladas por uma camada de cristal do tipo oposto, que controla a passagem de corrente entre as outras duas. Cada uma dessas camadas recebe um nome em relação à sua função na operação do transistor. As extremidades são chamadas de **emissor** e **coletor**, e a camada central é chamada de **base**. Os aspectos construtivos simplificados e os símbolos elétricos dos transistores são mostrados na figura a seguir. Observa-se que existem duas possibilidades de implementação.



Aspectos Construtivos e Símbolos dos Transistores

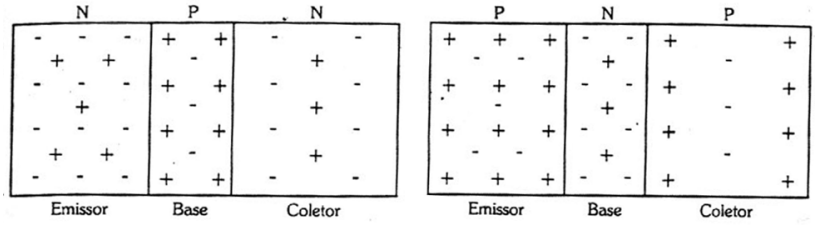
O transistor da figura (a) é chamado de **transistor NPN** e o da figura (b) de **transistor PNP**.

O transistor é hermeticamente fechado em um encapsulamento plástico ou metálico. Na tabela abaixo, tem-se alguns exemplos de transistores e o código padronizado para os encapsulamentos.

Aspecto Físico	Encapsulamento	Potência Máxima
	TO-92	1W
	TO-220	100W
	TO-3	200W

Aspecto Físico dos Transistores

Pela figura abaixo, percebe-se que o **emissor** é **fortemente dopado**, e tem como **emitir** portadores de carga para a base (elétrons no transistor NPN e lacunas no PNP).

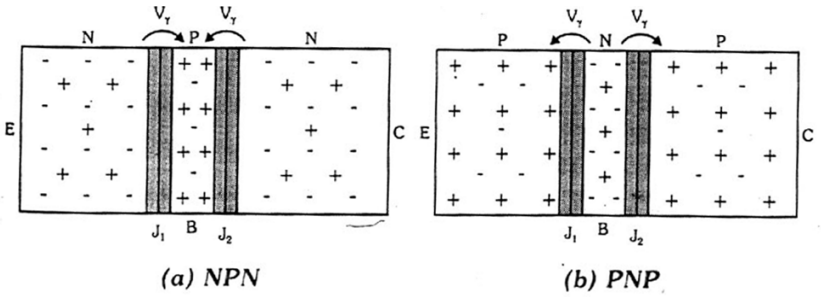


Portadores nos Transistores

A **base** tem uma **dopagem média** e é **muito fina**. Assim, a maioria dos portadores lançados do emissor para a base, conseguem atravessá-la, dirigindo-se ao coletor.

O **coletor** é **levemente dopado** e, como seu nome diz, **coleta** (recolhe) os portadores que vêm da base. Ele é muito maior que as outras camadas, pois é nele que se dissipa a maior parte da potência gerada pelos circuitos transistores.

Relembrando que os portadores majoritários do material tipo N são os elétrons livres e do material tipo **P** são as **lacunas**, pode-se observar o seguinte:



(a) NPN *(b) PNP*

Barreiras de Potências nos Transistores

Da mesma forma que na junção PN dos diodos, nas **duas** junções J_1 e J_2 dos transistores surgem, devido à recombinação dos portadores, barreiras de potenciais, cujos valores, a 25°C, são: Vg = 0,7V para semicondutores de silício e Vg = 0,3V para semicondutores de germânio.

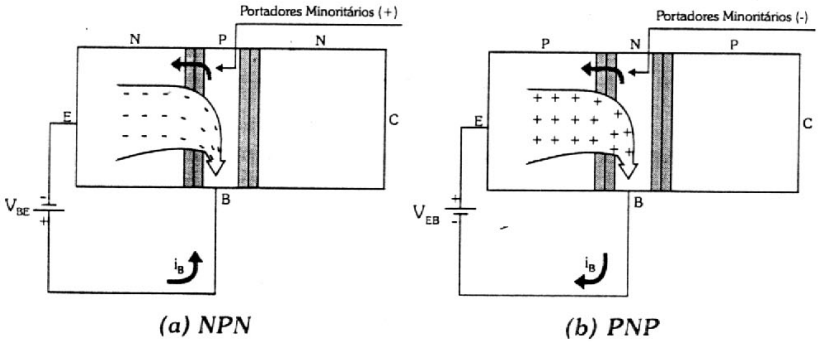
O comportamento básico dos transistores em circuitos eletrônicos é fazer o controle da passagem de corrente entre o emissor e o coletor através da base. Isso é conseguido, polarizando-se adequadamente suas duas junções, como será visto a seguir.

Funcionamento dos transistores NPN e PNP

Para se entender como funcionam os transistores, cada junção será polarizada separadamente, sendo depois unidas para a análise do comportamento do dispositivo como um todo.

Obs.: Não se esqueça de que a corrente convencional tem sentido contrário ao do fluxo de elétrons e mesmo sentido que o do fluxo de lacunas.

Polarizando-se a junção emissor-base diretamente, com V_{BE} (NPN) e V_{EB} (PNP), obtém-se o que mostra a figura.



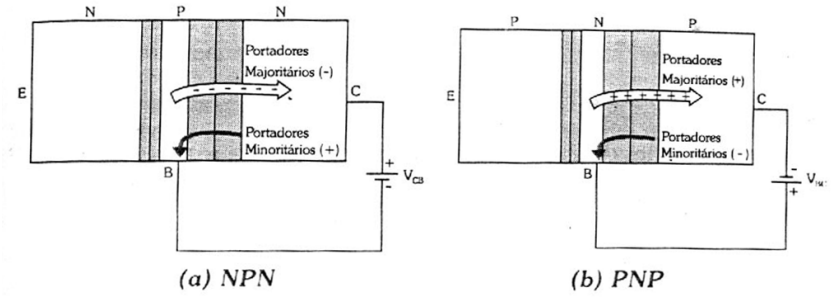
(a) NPN *(b) PNP*

Polarização direta da junção emissor-base

Neste caso, a junção emissor- base funciona como um diodo polarizado diretamente, ou seja, circula por ela uma grande corrente i_B g de portadores majoritários (elétrons livres no transistor NPN e lacunas no PNP).

Observa-se também, que existe uma pequena corrente em sentido contrário devido aos portadores minoritários. Esta corrente é chamada de corrente de fuga.

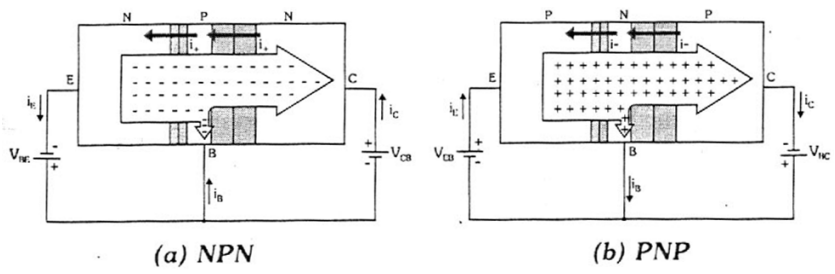
Agora polarizando-se a outra junção base - coletor reversamente com $V_{CB} > V_{BE}$ (NPN) e $V_{BC} > V_{EB}$ (PNP), tem-se o seguinte fenômeno, mostrado na figura seguinte.



Polarização reversa da junção base-coletor

Neste caso, a barreira de potencial aumenta, diminuindo drasticamente o fluxo de corrente dos portadores majoritários. Porém, os portadores minoritários atravessam a barreira com facilidade no sentido contrário, fazendo circular uma corrente reversa, ainda menor e praticamente desprezível, pois tais portadores são em pequeno número.

Reunindo-se as duas polarizações anteriores, obtém-se o que mostra a figura abaixo.



Polarização completa

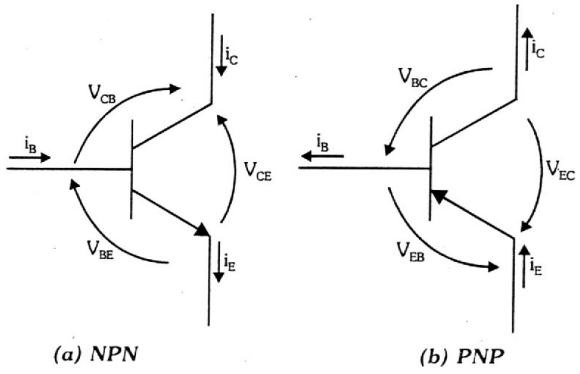
Observa-se que o fluxo de portadores majoritários na junção emissor-base, que antes se dirigia ao terminal da base,

agora, devido à atração maior exercida pelo coletor, dirige-se quase que totalmente para ele, atravessando a outra junção base- coletor sem encontrar dificuldades.

Para explicar por que a corrente se dirige menos à base e mais para o coletor, basta lembrar que a base é mais estreita que o emissor e o coletor a menos dopada que o emissor. Assim, os portadores que vêm do emissor saturam a base rapidamente através das recomendações, fazendo com que eles se dividam da seguinte maneira: uma pequena parte saindo pelo terminal de base e a maior parte saindo pelo terminal de coletor, atraídos por sua tensão.

Tensões e correntes nos transistores NPN e PNP

Pelo que foi exposto até aqui, pode-se montar um esquema geral de tensões e correntes de portadores majoritários para transistores NPN e PNP (considerando o sentido convencional



Tensões e correntes nos transistores

Aplicando-se a Primeira Lei de Kirchhoff para as correntes e a Segunda Lei de Kirchhoff para tensões em ambos os transistores, obtém-se as seguintes equações:

NPN ou PNP: $i_E = i_C + i_B$

NPN: $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

PNP: $V_{BC} = V_{EB} + V_{BC}$

Observação

As correntes de portadores minoritários, por serem muito menores que as de portadores majoritários, serão sempre desprezadas, salvo observações em contrário.

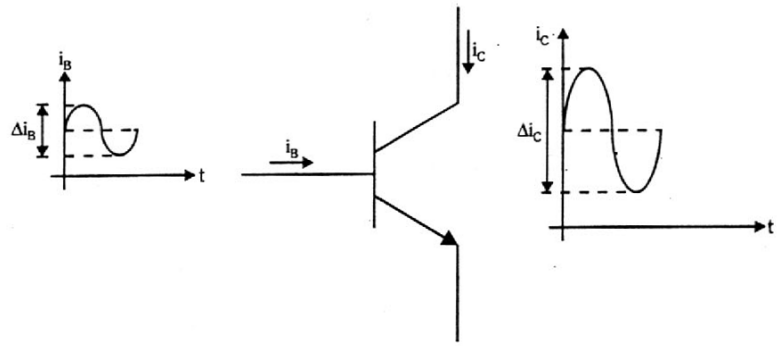
Efeito amplificação

Analisando o fenômeno que ocorre com a polarização completa do transistor NPN sob o aspecto da variação das correntes, tem-se o seguinte:

- Um aumento na corrente de base i_B provoca um número maior de recombinações, aumentando a corrente de coletor i_C. Da mesma forma, a diminuição da corrente de base provoca a diminuição na corrente entre emissor e coletor;

- A corrente de base, sendo bem menor que a corrente de coletor, faz com que uma pequena variação Di_B provoque uma grande variação Di_C. Isto significa que a variação de corrente de coletor é um reflexo amplificado da variação da corrente ocorrida na base;

- O fato do transistor possibilitar a ampliação de um sinal faz com que ele seja considerado um dispositivo ativo;



Efeito amplificação no transistor NPN

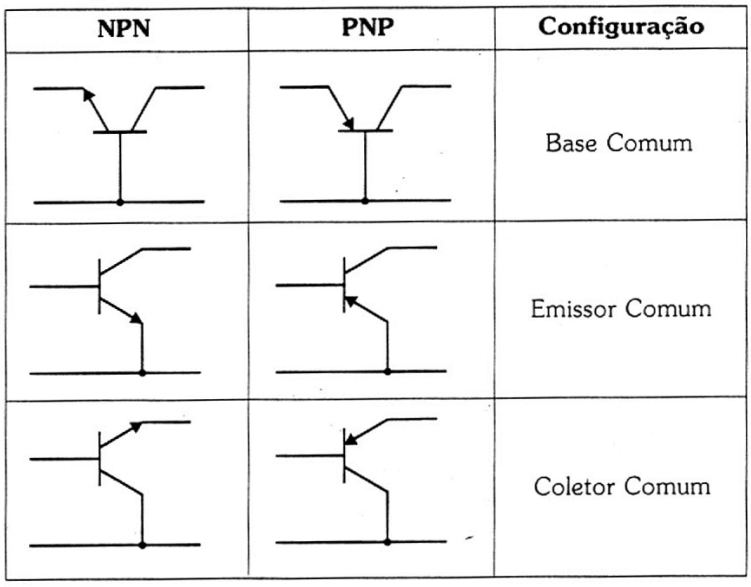
Este efeito amplificador, denominado ganho de corrente, pode ser expresso matematicamente pela relação entre a variação da corrente de coletor Di_C c e a variação de corrente de base Di_B, isto é:

Ganho de corrente: Di_C / Di_B

Este efeito amplificador ocorre também no transistor PNP, só que as correntes fluem no sentido contrário.

Configurações básicas

Os transistores podem ser utilizados em três configurações básicas Base Comum (BC), Emissor Comum (EC) e Coletor Comum (CC), onde o termo “comum” significa que o terminal é comum à entrada e à saída do circuito, como mostra esquematicamente a figura abaixo.



Configurações básicas dos transistores

Cada uma destas configurações tem características especificas e, portanto, aplicações diferentes.

Principais características das configurações

Para facilitar o cálculo da polarização dos transistores, os fabricantes podem fornecer duas funções na forma gráfica. Uma relacionada com a característica de entrada e outra com a característica de saída de cada configuração. Em geral, os fabricantes fornecem as curvas características de cada configuração. Em geral, os fabricantes fornecem as curvas características da configuração EC, sendo que a partir desta, é possível obter os parâmetros para as outras configurações.

A característica de entrada mostra a relação ente a corrente e a tensão de entrada para vários valores constantes de tensão de saída, formando um grupo de curvas, uma para cada tensão de saída.

Na característica de saída, tem-se a relação entre a corrente e a tensão de saída para vários valores constantes de corrente de entrada , formando um grupo de curvas, uma para cada corrente de entrada.

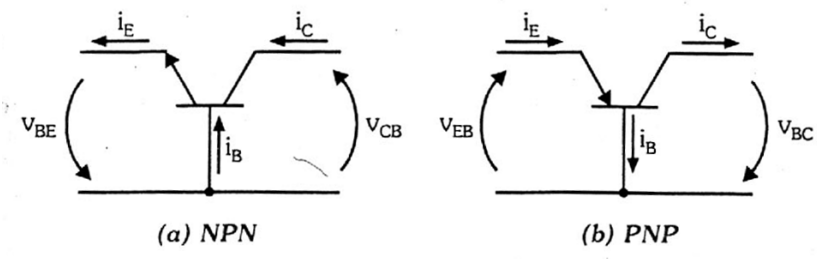
A partir destas curvas, é possível calcular os resistores de polarização mais adequados para uma determinada configuração e aplicação, assunto este a ser analisado no próximo capítulo.

Observação

Por uma questão de convenção, as tensões e as correntes serão representadas pelas letras maiúsculas V e I quando se tratar de valores constantes ou bem determinados, e pelas letras minúsculas v e i quando se tratar de valores genéricos ou variáveis.

Configuração base comum (BC)

Nesta configuração, o emissor é o terminal de entrada de corrente e o coletor é o terminal de saída de corrente do circuito, sendo que o terminal de base é comum às tensões de entrada e saída, como mostra a figura, para transistores NPN e PNP.



Configurações base comum (BC)

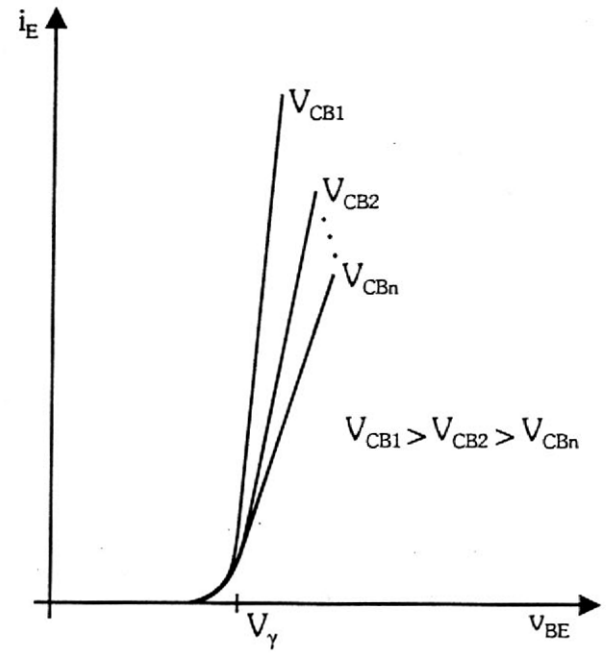
Observação

Nesse momento, já ficou claro que todos os fenômenos concernentes ao transistor NPN, assemelham-se aos que

ocorrem no transistor PNP, invertendo-se, porém, todas as tensões e correntes. Desta forma, para que as aplicações não se tornem repetitivas e, salvo observação em contrário, daqui para frente será tomado como referência o transistor NPN, uma vez que na prática, é o mais utilizado.

Curva característica de entrada BC

Para cada valor constante d tensão de saída V_{CB} varando-se a tensão de entrada V_{BE}, obtém-se uma corrente de entrada i_E, resultando num gráfico em o seguinte aspecto:



Curva característica de entrada BC

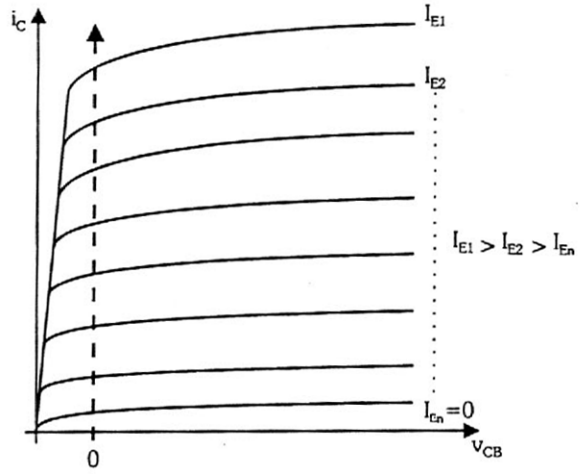
Observa-se que a característica de entrada, ou característica de emissor, é semelhante à curva característica de um diodo, pois a junção emissor - base funciona como um diodo polarizado diretamente. Ou seja, a partir do momento em que a tensão de entrada faz os portadores vencerem a barreira de potencial (Vg = 0,7V para o silício e Vg = 0,3V para o germânio), a corrente através da junção dispara. Assim, nesta região da curva, pequenas variações de V_{BE} causam grandes variações de i_E.

Observa-se que a característica de entrada, ou característica de emissor, é semelhante à curva característica de um diodo, pois a junção emissor - base funciona como um diodo polarizado diretamente. Ou seja, a partir do momento em que a tensão de entrada faz os portadores vencerem a barreira de

potencial (Vg = 0,7V para o silício e Vg = 0,3V para o germânio), a corrente através da junção dispara. Assim, nesta região da curva, pequenas variações de V_{BE} causam grandes variações de i_E.

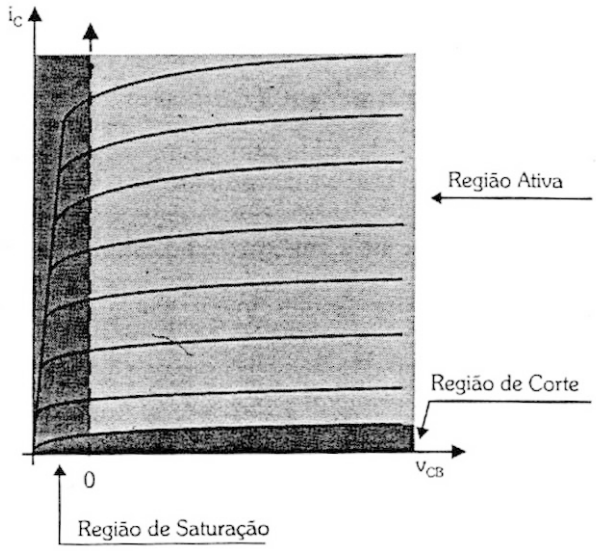
Curva característica de saída BC

Para cada valor constante de corrente de entrada I E_1, variando-se a tensão de saída V_{CB}, obtém-se uma corrente saída i_C cujo gráfico tem o seguinte aspecto:



Curva característica de saída BC

A característica de saída, ou de coletor, pode ser dividida em três regiões distintas, pois em cada uma delas o transistor tem um comportamento específico.



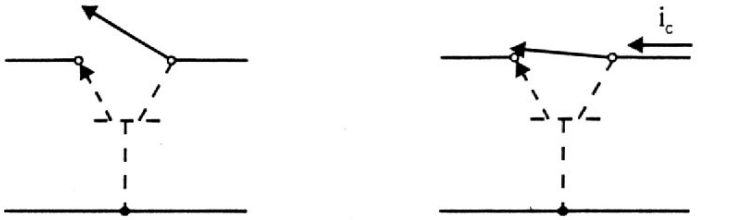
As três regiões de trabalho de um transistor NPN

Na região de corte, as duas funções estão polarizadas reversamente, fazendo com que a corrente de coletor (saída) seja praticamente nula (I_C =0)stivesse desconectado do circuito.

Na região da saturação, as duas junções estão polarizadas diretamente, fazendo com que uma pequena variação de tensão V_{CB} (saída) resulte numa enorme variação da corrente de coletor (saída). Neste caso, o transistor está saturado. É como seus terminais estivessem em curto-circuito (V_{CB} = 0).

Na região ativa, a junção emissor-base está polarizada diretamente e a junção base - coletor reversamente. Esta é a região central do gráfico d saída, onde as curvas são lineares. Portanto é esta região utilizada na maioria das aplicações, principalmente na amplificação de sinais, para que a distorção seja mínima.

Por outro lado, trabalhando nas regiões de corte e saturação, o transistor comporta-se como uma chave eletrônica, isto é, chave aberta quando ele está cortado e chave fechada quando ele está saturado.



(a) Transistor Cortado *(b) Transistor Saturado*

Analogia de um transistor com uma chave

Este comportamento do transistor como uma chave tem diversas aplicações práticas, e será explorado mais adiante.

Ganho de corrente na configuração base comum

O ganho de corrente de um circuito qualquer é a relação entre a variação da corrente de saída e a variação da corrente de entrada, para tensão de saída constante. Na configuração BC, o ganho de corrente é chamado de a (alfa), sendo definido matematicamente por:

$$\alpha = \left.\frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}\right|_{V_{CB} = cte}$$

Porém, como se pôde observar na figura da página 17, na região ativa, as curvas de i_E são praticamente paralelas ao eixo V_{CB}. Assim, pode-se reescrever a relação acima da seguinte forma:

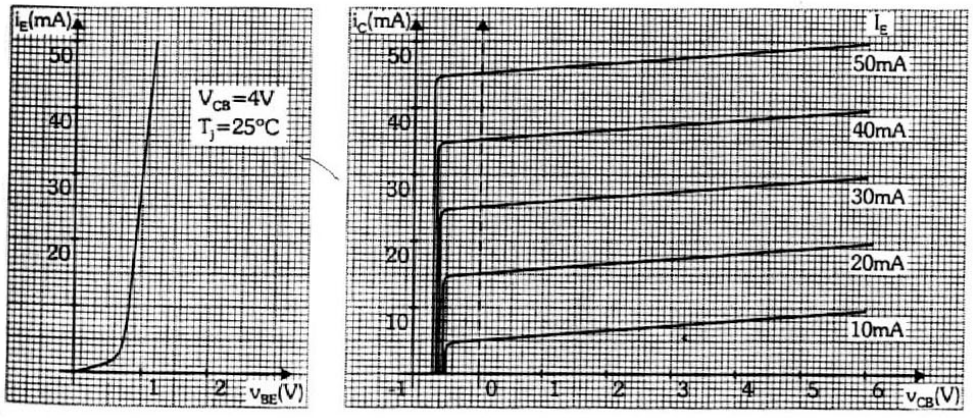
$$\alpha = \frac{i_C}{i_E}$$

Lembrando que $i_E = i_C + i_B$, concluí-se que o ganho de corrente a é sempre menor que 1. Na maioria dos transistores, este valor está entre 0,90 a 0,98, ou seja, é próximo de 1. Fisicamente, isto se explica pelo fato de a corrente de base, formada a partir da corrente de emissor, ser muito pequena, como havia sido mostrado na figura da página 17 (polarização completa do transistor) e, graficamente, isto pode ser visualizado pela pouca inclinação das curvas de i_E na característica de saída.

Exemplo

Dadas as curvas características de entrada e saída de um transistor NPN, determinar:

a) A tensão de entrada aproximada, a partir da qual a corrente de entrada começa a fluir de forma intensa;
b) De qual material semi - condutor é feito esse transistor;
c) A corrente de entrada, quando a tensão de entrada vale 1V;
d) A corrente de saída, nas condições do item c;
e) A corrente na base, nas condições do item d;
f) O ganho de corrente, nas condições do item d.

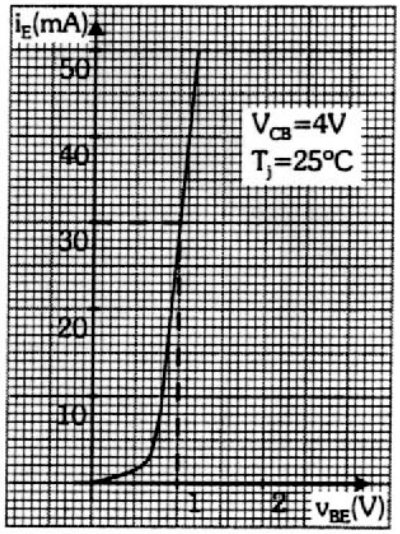


Curvas características do transistor

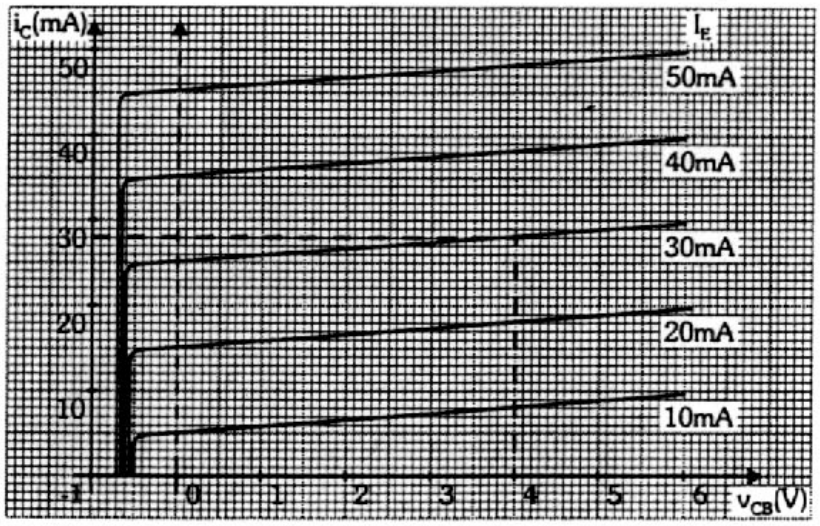
a) Pela curva característica de entrada, tem-se que a corrente de entrada i_E começa a crescer quando a tensão de entrada V_{BE} = 0,7V.

b) Pelo valor de V_{BE} de condução, o transistor é de silício.

c) Para V_{BE} = 1V, tem-se que i_E = 30mA.



d) A curva característica de entrada foi obtida para tensão de saída constante V_{CB} = 4V (vide detalhe no gráfico). Entrando com esse valor de curva característica de saída, juntamente com a corrente de entrada i_E obtida no item c, tem-se que a corrente de saída i_C = 28mA.



e) Para o cálculo de i_B, tem-se que:

$i_E = i_B + i_C$ à 30 = i_B + 28 à i_B = 2mA

f) Com os valore de i_C e i_E obtidos nos itens anteriores,

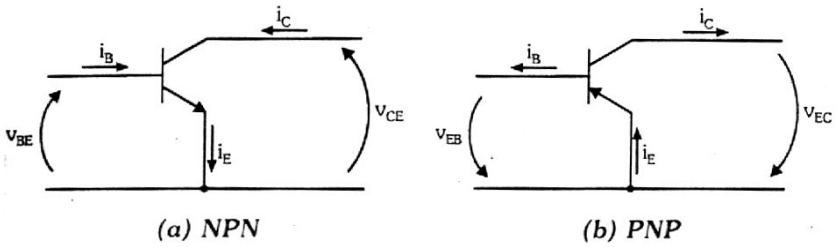
tem-se que o ganho de corrente de transistor, nestas condições, vale:

$$\alpha = \frac{i_C}{i_E} = \frac{28x10^{-3}}{30x10^{-3}} = 0,93$$

Configuração emissor comum (EC)

Esta configuração é a mais utilizada em circuitos transistorizados. Po isso, os diversos parâmetros dos transistores fornecidos pelos manuais técnicos têm como referência a configuração emissor comum.

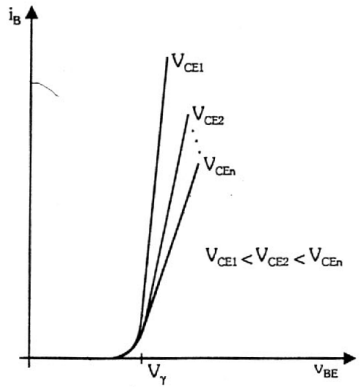
Nesta configuração, a base é o terminal de entrada de corrente e o e o coletor é o terminal de saída de corrente do circuito, sendo que o terminal de emissor é comum às tensões de entrada e saída, como mostra a figura abaixo, para transistores NPN e PNP.



Configuração emissor comum (EC)

Curva característica de entrada EC

Para cada valor constante de tensão de saída V_{CE}, variando-se a tensão de entrada V_{BE}, obtém-se uma corrente de entrada i_B, resultando num gráfico com o seguinte aspecto:



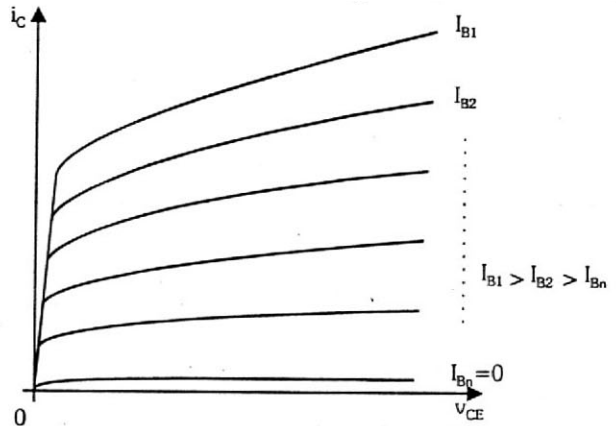
Curva característica de entrada EC

A curva característica de entrada, ou características de base, é semelhante à da configuração BC, pois tem-se também a junção polarizada diretamente.

Observa-se , portanto, que é possível controlar a corrente de base variando-se a tensão entre base e emissor.

Curva característica de saída EC

Para cada valor constante de corrente de entrada i_B, variando-se a tensão de saída V_{CE}, obtém-se uma corrente de saída i_C, cujo gráfico tem o seguinte aspecto:



Curva característica de saída EC

A característica de saída, ou de coletor, é também muito parecida com a de configuração BC. Mas observa-se que a inclinação das curvas de i_B constante, na região ativa, é muito maior.

Nesta curva, distinguem-se também as três regiões de trabalho do transistor:

- Corte - $I_C \cong 0$
- Saturação - $V_{CE} \cong 0$
- Ativa - região entre o corte e a saturação (I_B é linear)

Ganho de corrente na configuração emissor comum

Para esta configuração, a relação entre a corrente de saída e a corrente de entrada, ou seja, a relação de i_C e i_B, determina o ganho de corrente denominado de β (beta) ou h_{FE} (forward current transfer ratio), como segue:

$$H_{FE} = \beta = \frac{i_C}{i_B}$$

Sendo i_C muito maior que i_B, o ganho de corrente β é sempre muito maior que 1, ou seja, na configuração emissor comum, o transistor funciona como um amplificador de corrente.

Por outro lado, como a inclinação das curvas varia para cada valor de i_B, o ganho corrente β não é constante. Valores típicos de β são de 50 a 900.

Ganho de corrente EC x ganho de corrente BC

A partir do ganho de corrente β, da configuração EC, pode-se obter o ganho de corrente α, de configuração base-comum, e vice-versa, como será demonstrado a seguir:

Num transistor, as correntes se relacionam da seguinte forma:

$$i_E = i_B + i_C \qquad \textbf{(I)}$$

Pelas equações dos ganhos de corrente, tem-se:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} \qquad \text{e} \qquad i_E = \frac{i_C}{\alpha}$$

Substituindo-se i_B e i_E na equação **(I)**:

$$\frac{i_C}{\alpha} = \frac{i_C}{\beta} + i_C \quad (\div i_C) \quad \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} + 1 \Rightarrow$$

$$\beta = \alpha + \alpha.\beta \Rightarrow \beta = \alpha(1+\beta) \Rightarrow$$

$$\boxed{\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}} \quad \text{ou} \quad \boxed{\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

Exemplos

Dadas as curvas características de entrada e saída de um transistor NPN, determinar:

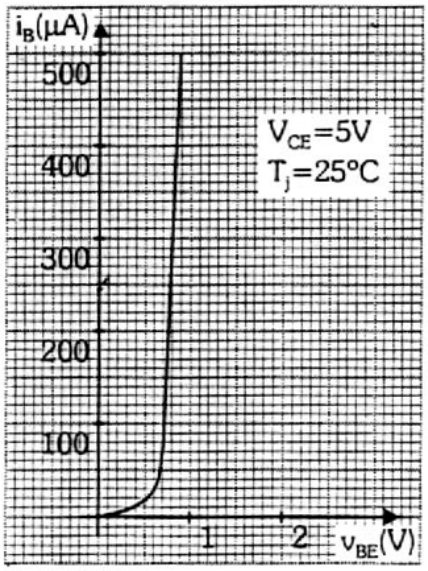
a) A corrente na base para V_{BE} = 0,8V;

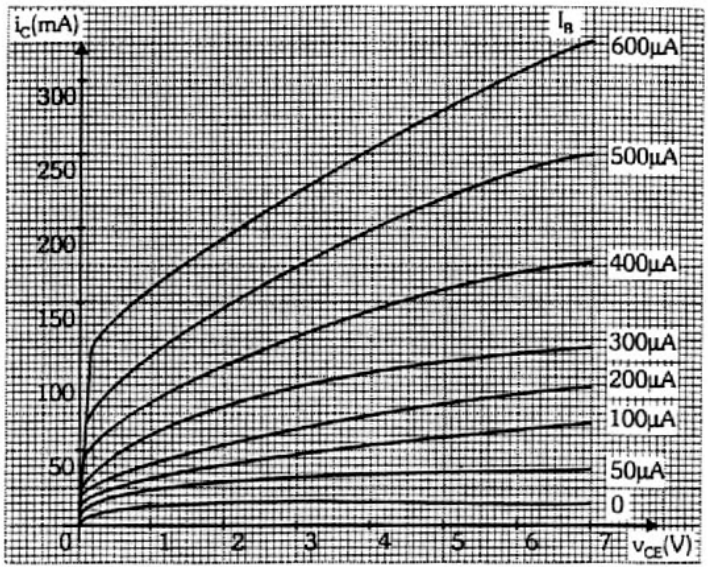
b) O ganho de corrente nas condições do item a;

c) O ganho de corrente na configuração BC;

d) O novo ganho de corrente, caso i_B dobre de valor, mantida a tensão V_{CE};

e) O novo ganho de corrente na configuração BC



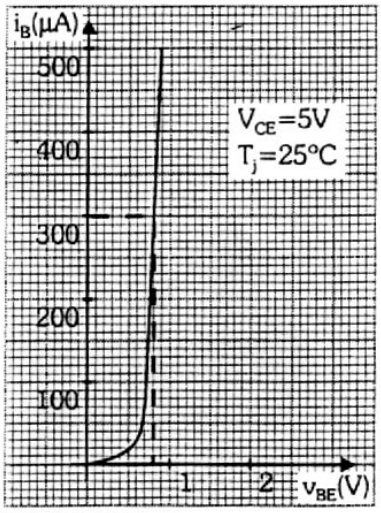


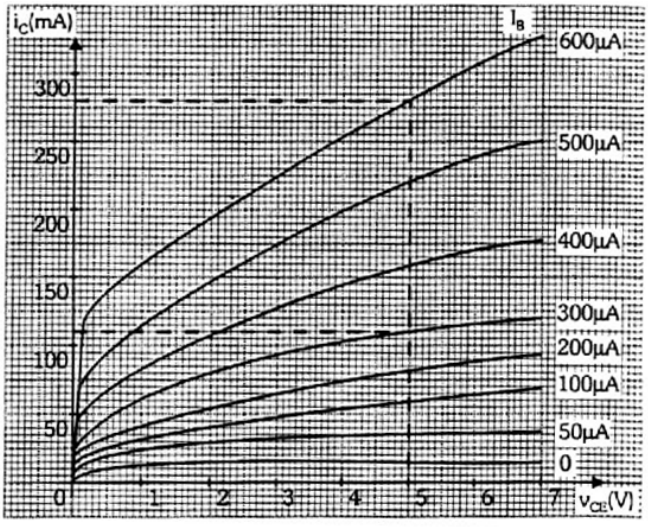
Entrada Saída

Curvas características do transistor

a) Para V_{BE} = 0,8V, tem-se que i_B = 300mA

b) A curva característica de entrada foi obtida para V_{CE} = 5V. entrando com esse valor na curva característica de saída, juntamente com a corrente de entrada i_B obtida no item “a”, tem-se que a corrente de saída i_C = 110mA.





Com os valores de ic e ib, tem-se que o ganho de corrente do transistor, nestas condições, vale:

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = \frac{110x10^{-3}}{300x10^{-6}} = 367$$

c) Na configuração BC, o ganho de corrente vale:

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \Rightarrow \frac{367}{1+367} \Rightarrow \alpha = 0{,}9973$$

d) Se a corrente de base dobrar de valor, tem-se i_B = 600mA

Pela curva característica de saída (mostrada anteriormente), chega-se ao novo valor da corrente do coletor:

i_C = 280μA

Assim:

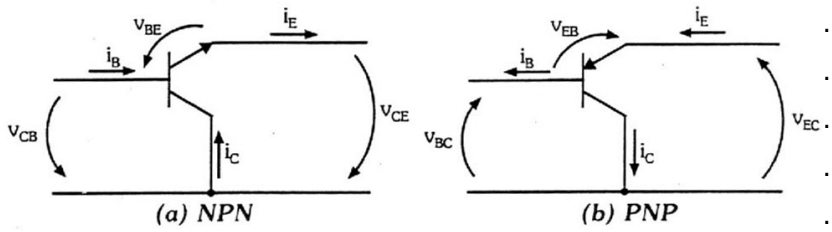
$$\beta' = \frac{i_C'}{i_B'} = \frac{280x10^{-3}}{600x10^{-6}} = 467$$

e) Na configuração BC, o ganho de corrente vale:

$$\alpha' = \frac{\beta'}{1+\beta'} \Rightarrow \alpha' = \frac{467}{1+467} \Rightarrow \alpha' = 0{,}9979$$

Configuração coletor comum (CC)

Nesta configuração, a base é o terminal de entrada de corrente e o emissor é o terminal de saída de corrente do circuito, sendo que o terminal de coletor é comum às tensões de entrada e saída, como mostra a figura, para transistores NPN e PNP.



Configuração coletor comum (CC)

Para a configuração coletor comum não é necessário curvas específicas de entrada e saída. Pode-se utilizar as mesmas características da configuração EC.

Isto se justifica pelo fato de sua característica de entrada relacionar i_B, V_{BE} e V_{CE}, e a sua característica de saída relacionar i_E , V_{CE} e i_B, como na configuração EC, sendo i_E praticamente igual a i_C ($\alpha \cong 1$).

Os limites do transistores

Os transistores, como quaisquer outros dispositivos, têm suas limitações (valores máximos de alguns parâmetros), que devem ser respeitadas, para evitar que os mesmos se danifiquem. Os manuais técnicos fornecem pelo menos quatro parâmetros que possuem valores máximos:

- Tensão máxima do coletor - V_{CE} max.
- Corrente máxima de coletor - I_C max.
- Potência máxima de coletor - P_C max

Onde:

Configuração EC e CC:

$$\mathbf{P_C\ max. = V_{CE}\ max\ .\ I_C\ max.}$$

Configuração BC:

$$\mathbf{P_C\ max. = V_{CB}\ max\ .\ I_C\ max.}$$

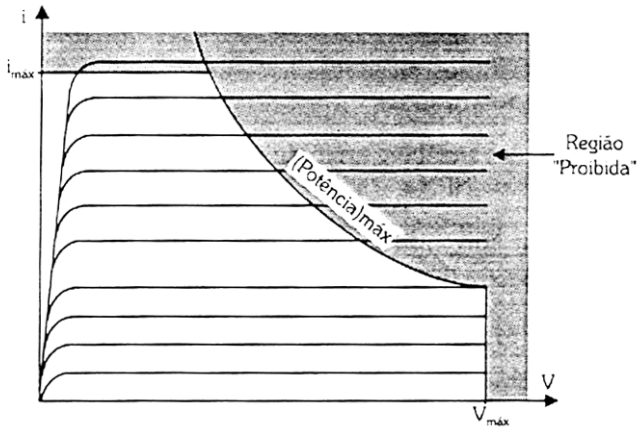
- Tensão da ruptura das junções BV (breakdown voltage):

BV_{CBO} - tensão de ruptura entre coletor e base, com emissor aberto.

BV_{CEO} - tensão de ruptura entre coletor e emissor, com base aberta.

BV_{CES} - tensão de ruptura entre coletor e emissor, com base e emissor curto-circuitados.

As limitações de tensão, corrente e potência podem ser vistas na curva característica de saída do transistor, como mostra a figura a seguir.



Limitações do transistor

Exemplos:

Parâmetros de alguns transistores:

Tipo	Polaridade	V_{CEmax} (V)	I_{Cmax} (mA)	β
BC548	NPN	45	100	125 a 900
2N2222	NPN	30	800	100 a 300
TIP31A	NPN	60	3000	20 a 50
2N3055	NPN	80	15000	20 a 50
BC559	PNP	-30	-200	125 a 900
BFX29	PNP	-60	-600	50 a 125

Solucionando Problemas

1) Quais as vantagens dos transistores em relação às válvulas?

.....

.....

2) Quais são as relações entre as dopagens e as dimensões no emissor, base e coletor de um transistor bipolar?

.....

.....

3) Para o funcionamento de um transistor, como devem estar polarizadas suas junções?

.....

.....

4) Relacione todos os fluxos de cargas (portadores majoritários e minoritários) existentes nos transistores NPN e PNP, quando estão polarizados.

.....

.....

5) Quais as relações entre as correntes e as tensões num transistor NPN e PNP?

.....

6) De que forma a corrente de base controla a corrente entre emissor e coletor?

.....

7) Explique o efeito amplificação.

.....

.....

Solucionando Problemas

8) Faça um esboço das curvas características de saída para os transistores NPN e PNP na configuração BC.

9) Faça um esboço das curvas características de entrada para os transistores de NPN e PNP na configuração BC.

10) Por que o ganho de corrente na configuração BC é um pouco menor que 1?

.....

11) Faça um esboço das curvas características de saída para os transistores NPN e PNP na configuração EC.

Solucionando Problemas

12) Faça um esboço das curvas características de saída para os transistores NPN e PNP na configuração EC.

13) Por que o ganho de corrente na configuração EC é muito maior que 1?

.....

.....

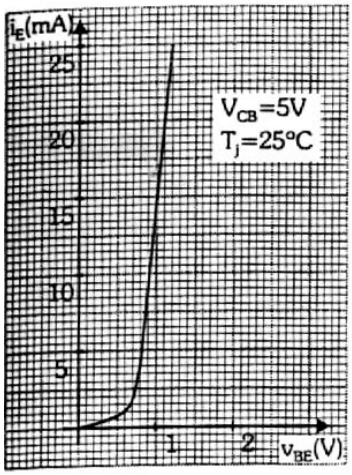
14) Relacione as três regiões de trabalho do transistor, identificando de que forma suas junções estão polarizadas.

.....

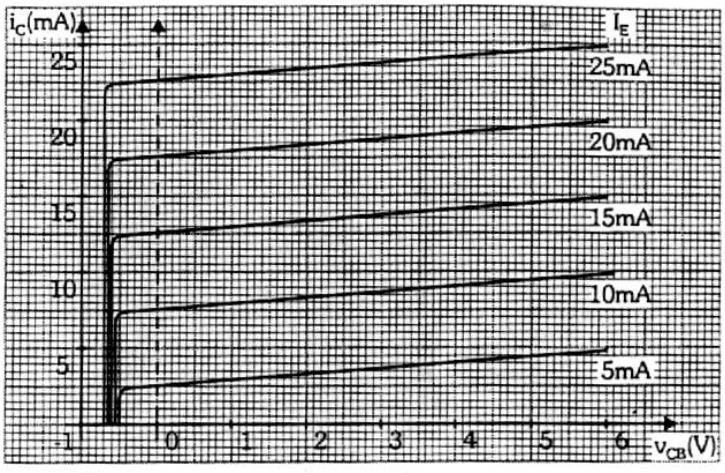
.....

.....

15) Um transistor na configuração BC tem as seguintes curvas características :



Entrada



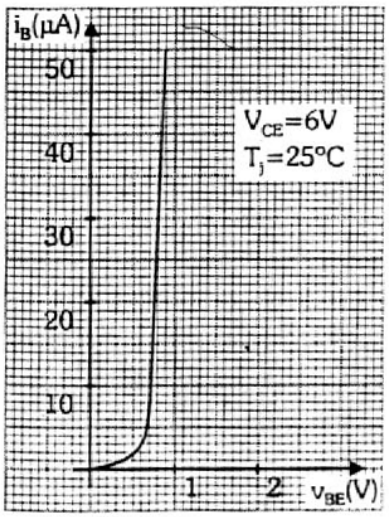
Saída

Solucionando Problemas

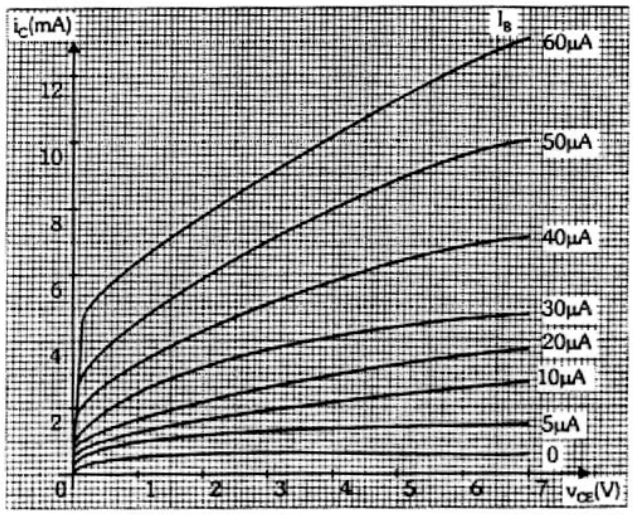
Completar a tabela a seguir (com valores aproximados) para cada uma das situações:

Situação	V_{CB} (V)	V_{BE} (V)	V_{CE} (V)	i_E (mA)	i_C (mA)	i_B (mA)	α	β
I	5,0	0,8						
II	5,0		6,0					
III	5,0			20				
IV	5,0				12			

16) Um transistor na configuração EC tem as seguintes curvas características:



Entrada



Saída

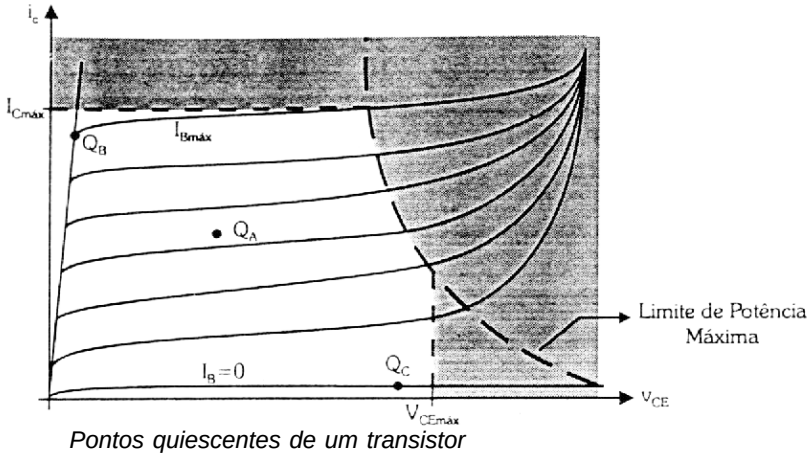
Ponto quiescente

Polarizar um transistor é fixá-lo num ponto de operação em corrente contínua, dentro das suas curvas características. Isto é, escolher valores de correntes e tensões adequados para o circuito do qual o transistor faz parte.

Por isso, a polarização é também chamada de polarização DC, pois fixa, através de resistores externos, valores de correntes e tensões continuas no transistor. Este ponto de trabalho do transistor , determinado pela polarização, é chamado de ponto de operação estática ou ponto quiescente (Q), cujo conceito já foi visto no estudo da polarização dos diodos.

A escolha do ponto quiescente é feita em função da aplicação que se deseja para o transistor, ou seja, ele pode estar localizado nas regiões de corte, saturação ou ativa da curva característica de saída.

Na figura seguinte, tem-se um exemplo de curva característica de saída de um transistor na configuração EC, na qual estão marcadas as diversas regiões do transistor. Nesta figura, tem-se também três pontos quiescentes, Q_A , Q_B e Q_C.



Pontos quiescentes de um transistor

O ponto Q_A encontra-se no centro da **região ativa**, permitindo grandes variações na corrente de entrada (i_B), na corrente de saída (i_C) e na tensão de saída (V_{CE}).

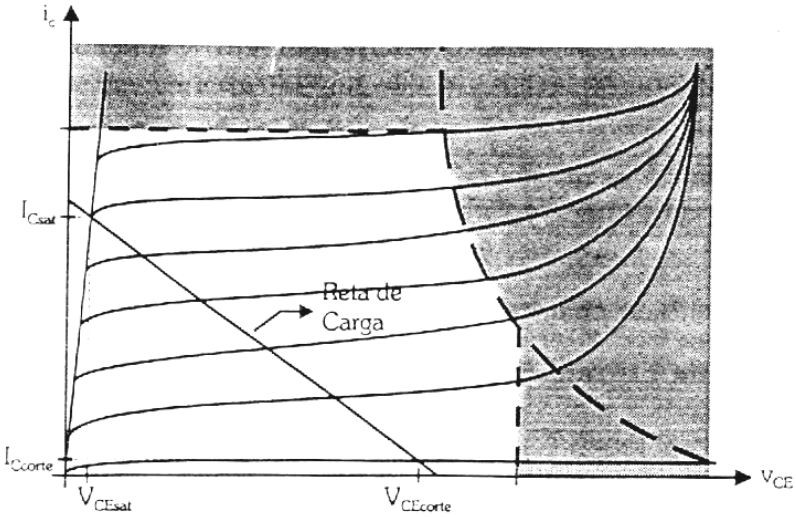
O ponto Q_B encontra-se na **região de saturação**, permitindo apenas variações negativas de i_B e i_C e variações positivas de V_{CE}.

O ponto Q_C encontra-se na **região de corte**, permitindo apenas variações positivas de i_B e i_C e variações negativas de V_{CE}.

Portanto, se numa determinada aplicação deseja-se que o sinal do circuito varie tanto positiva como negativamente em relação ao ponto de operação, o ponto Q_A é o mais indicado.

Reta de carga

A **reta de carga** é o lugar geométrico de todos os pontos quiescentes possíveis para uma determinada polarização, como mostra a figura a seguir.



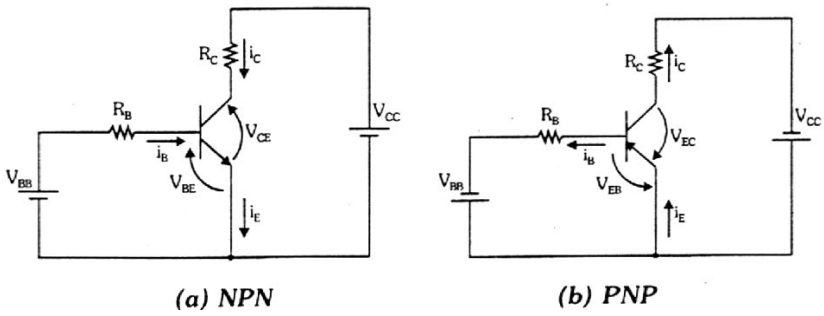
Reta de carga de um transistor

Por ser uma reta, ela necessita de apenas **dois** pontos de operação conhecidos para sua determinação.

Além disso, a reta de carga depende da configuração adotada para o transistor, como será visto a seguir.

Circuito de polarização em emissor comum

Nesta configuração, a junção base - emissor é polarizada diretamente e a junção base coletor reversamente. Para isso, utilizam-se duas baterias e dois resistores para limitar as correntes e fixar o ponto quiescente do circuito.



(a) NPN *(b) PNP*

Circuito de polarização em emissor comum

Considerando apenas o transistor NPN, pode-se fazer a análise das malhas de entrada e saída.

Malha de entrada:

$R_B \cdot i_G + V_{BE} = V_{BB}$

Portanto, a equação de R_B é:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{i_B}$$

Malha de saída:

$R_C \cdot I_C + V_{CE} = V_{CC}$

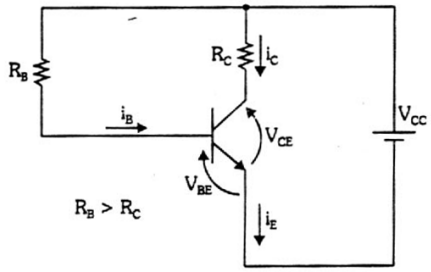
Portanto a equação de R_C é:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{i_C}$$

Existem várias formas de simplificar esse circuito, eliminando-se uma das formas de alimentação, como serão vistas a seguir.

Circuito de polarização EC com corrente de base constante

Para eliminar a fonte de alimentação da base V_{BB}, pode-se fazer um divisor de tensão entre o resistor de base R_B e a junção base - emissor, utilizando apenas a fonte V_{CC}, como mostra a figura a seguir.



Polarização EC com corrente de base constante

Para garantir a polarização direta da junção base - emissor, e reversa da junção base coletor, R_B deve ser maior que R_C.

Rescrevendo-se as equações das malhas d entrada e saída, tem-se :

Malha de entrada:

$R_B . I_B + V_{BE} = V_{CC}$

Portanto, a equação de R_B é:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{i_B}$$

Malha de saída:

$R_C . I_C + V_{CE} = V_{CC}$

Portanto, a equação de R_C é:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{i_C}$$

Neste circuito, como V_{CC} e R_B são valores constantes e V_{BE} praticamente não varia, a variação da corrente de polarização da base é desprezível. Por isso, este circuito é chamado de polarização EC com corrente de base constante.

Observação

- Ao se adotarem valores comerciais para os resistores de polarização, impõe-se um pequeno deslocamento no ponto quiescente. Porém, este erro não é relevante, dado que todos os parâmetros do transistor são, também, valores estimados pelos fabricantes, sem contar a tolerância dos resistores de polarização.

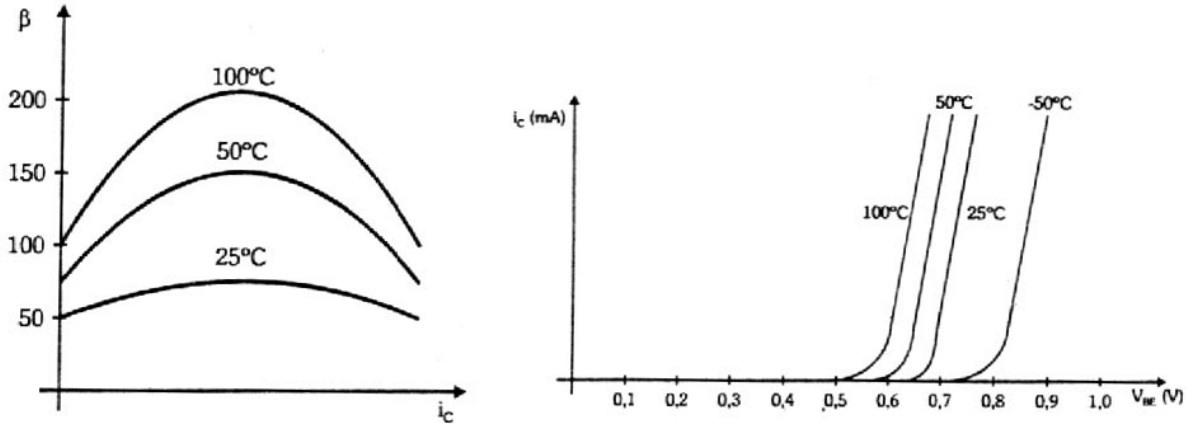
O circuito de polarização EC com corrente de base constante tem o inconveniente de ser muito sensível a variações de temperatura.

Influência da temperatura no comportamento dos transistores

O cristal semicondutor é um material sensível à temperatura , isto é, seu aumento pode fornecer energia suficiente aos átomos do cristal, gerando novos portadores.

Assim sendo, os diodos e transistores sofrem influência da temperatura. No caso dos transistores, a variação da temperatura altera principalmente o parâmetro β, V_{BE} e corrente de fuga.

Na figura abaixo, está esboçada graficamente a influência da temperatura para o parâmetro β e V_{BE}.

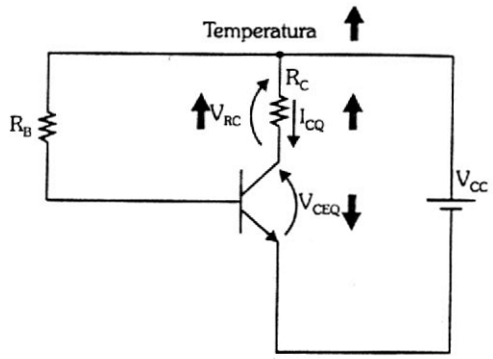


Influência da temperatura no transistor

A variação de V_{BE} com a temperatura é desprezível (por exemplo: o aumento de temperatura de 25°C para 50°C causa uma diminuição aproximada de 0,05V em V_{BE}). Porém, a corrente de fuga e o β podem ter variações acentuadas (no caso de β, a mesma variação de temperatura pode dobrá-lo). Isto ocasiona uma grande variação na corrente de coletor, sem que haja variação na corrente de base, deixando o circuito instável.

Com a determinação do ponto quiescente, o que se deseja é fixar a corrente e a tensão de saída do circuito. No caso do circuito de polarização na configuração EC, reproduzindo

agora na figura abaixo, o ponto quiescente deve **fixar** os valores de I_{CQ} e V_{CEQ}.



Variação do ponto Q por influência da temperatura

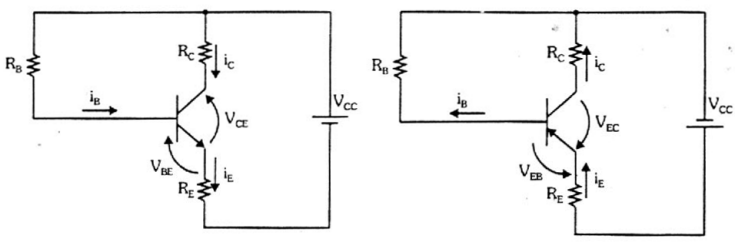
Analisando a malha de saída, formado por V_{CC}, R_C e V_{CE}, observa-se que o aumento de temperatura faz com que a corrente de coletor I_{CQ} aumente (aumento da corrente quiescente), aumentando a tensão V_{RC}. Sendo V_{CC} constante, esse aumento de V_{RC} tem que ser compensado pela diminuição de V_{CEQ} (diminuição da tensão quiescente). A diminuição de V_{CEQ} provoca novo aumento de I_{CQ}, resultando numa realimentação positiva, ou seja, numa instabilidade do circuito.

Portanto, uma forma de contornar esse problema, é forçar uma realimentação negativa, sempre que houver a tendência de instabilidade no circuito.

A solução para isto é colocar em série com o emissor um resistor R_E.

Circuito de polarização EC com corrente de emissor constante

Neste circuito de polarização, é inserido um resistor R_E entre o emissor e a fonte de alimentação, como mostra figura a seguir, para resistores NPN e PNP.



(a) NPN *(b) PNP*

Polarização EC com corrente de emissor constante

Analisando o circuito de polarização do transistor NPN, percebe-se que, se ocorrer um aumento na corrente de coletor devido ao aumento da temperatura, a corrente de emissor também aumenta. Conseqüentemente aumentariam V_{RC} e V_{RE}. Isto provocaria uma diminuição de V_{CEQ}, dando início a realimentação positiva (instabilidade).

Porém o aumento de V_{RE} causa uma diminuição de V_{RB} na malha de entrada, já que V_{BEQ} se mantém praticamente constante.

A diminuição de V_{RB}, por sua vez, provoca a diminuição de I_{BQ} e, conseqüentemente, de I_{CQ}, compensando seu aumento inicial.

A resposta dada por R_E para o aumento de I_{CQ}, chama-se **realimentação negativa**, e garante a **estabilidade** do circuito e do ponto quiescente.

Como a realimentação negativa faz I_{CQ} voltar ao seu valor original, o mesmo acontece com I_{EQ}, que mantém-se, portanto, constante. Por isso, esse circuito de polarização é conhecido por **polarização EC com corrente de emissor constante.**

Equacionando o circuito de polarização NPN, tem-se:

Malha de entrada:

$R_B \cdot i_B + V_{BE} + R_E \cdot i_E = V_{CC}$

Portanto a equação de R_B é:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E \cdot i_E}{i_B}$$

Malha de saída:

$R_C \cdot i_C + V_{CE} + R_E \cdot i_E = V_{CC}$

Portanto, a equação de R_C é:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - R_E \cdot i_E}{i_C}$$

Neste caso, tem-se duas equações para três incógnitas: R_B, R_C e R_{CE}.

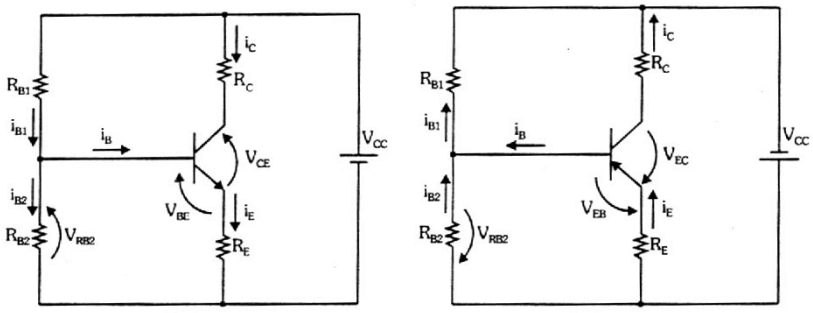
Na prática, esse problema é resolvido, adotando-se um dos seguintes critérios:

1°) Adota-se um valor par R_E compatível com as tensões e correntes do circuito, ou:

2°) Adota-se uma tensão para V_{RE} de valor pequeno em relação à V_{CC}, para que o resto da tensão possa ser utilizada para determinar a tensão e a corrente de saída quiescentes, respectivamente, V_{CEQ} e I_{CQ} (esta última, através de V_{RC}). Normalmente, utiliza-se $V_{RE} = V_{CC}/10$.

Circuito de polarização EC com divisor de tensão na base

Uma outra forma de solucionar o problema de instabilidade com a temperatura é o circuito de polarização mostrada na figura abaixo, conhecido como polarização por divisor de tensão na base.



(a) NPN *(b) PNP*

Polarização EC com divisor de tensão na base

A análise feita a seguir, refere-se ao transistor NPN.

O circuito de polarização por divisor de tensão na base é projetado de forma a fixar o valor V_{VB2}.

Da malha de entrada tem-se:

$V_{RB2} = V_{BE} + V_{RE}$

Fixado o valor de V_{RB2} como V_{BE} é praticamente constante com a temperatura, V_{RE} também permanece constante. Isto garante a estabilização de I_{EQ} e I_{CQ}, independente da variação de β.

O valor R_{B2} pode ser fixado a partir de sua corrente, adotando-se o seguinte critério:

- $I_{B2} = 10.1_B$

Equacionando esse circuito, tem-se:

Malhas de entrada:

$R_{B2} . I_{B2} = V_{BE} + R_E . I_E$

$R_{B1} . I_{B1} + V_{BE} + R_E . i_E = V_{CC}$

Portanto as equações de R_{B2} e R_{B1}:

$$R_{B2} = \frac{V_{BE} + R_E . i_E}{i_{B2}} \quad e \quad R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E . i_E}{i_{B1}}$$

Malhas de saída:

$R_C . I_C + V_{CE} + R_E . I_E = V_{CC}$

Portanto as equações de R_c é:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - R_E . i_E}{i_C}$$

Para este tipo de polarização, devido ao número de incógnitas, vale também o seguinte critério prático:

$V_{RE} = V_{CC}$ /10

Determinação da reta de carga

Ponto de saturação:

$V_{CEsat} = 0$

Pela equação de malha de saída tem-se:

$R_C . I_{Csat} + V_{CEsat} + R_E . I_{Esat} = V_{CC} \rightarrow R_C . I_{Csat} + Re . I_{Esat} = V_{CC}$

Mas, $i_C \cong i_E$. Portanto:

$$(R_C + R_E).I_{Csat} = V_{CC} \Rightarrow I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{(R_C + R_E)}$$

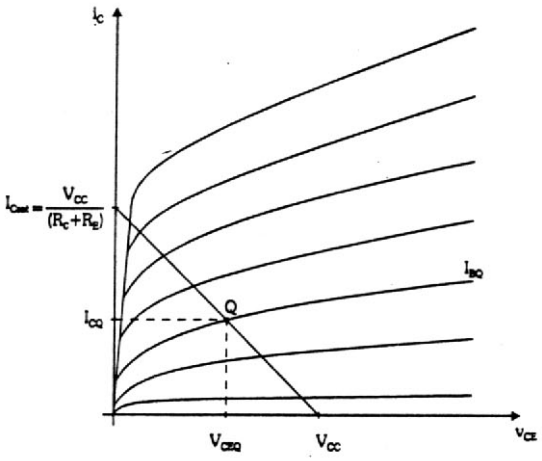
Ponto de corte:

$I_{Ccorte} = I_{Ecorte} = 0$

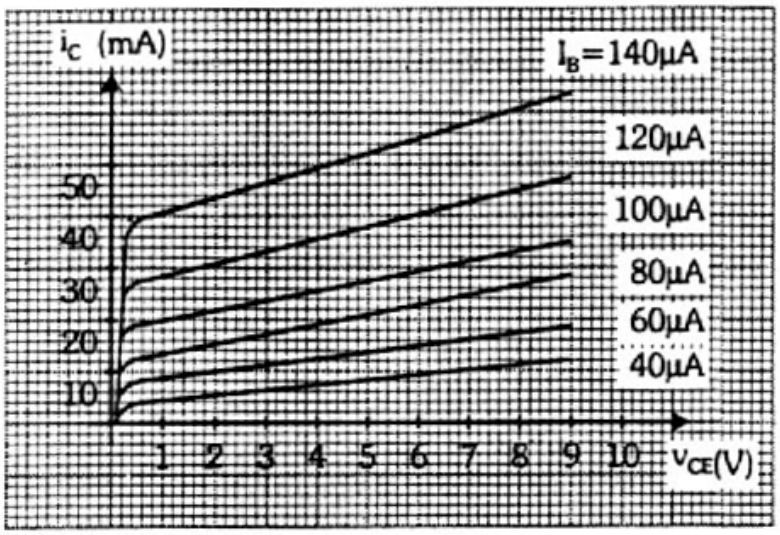
Pela equação da malha de saída, tem-se:

$R_C \cdot I_{Ccorte} + V_{CEcorte} + R_E \cdot I_{Ecorte} = V_{CC} \rightarrow V_{CEcorte} = V_{CC}$

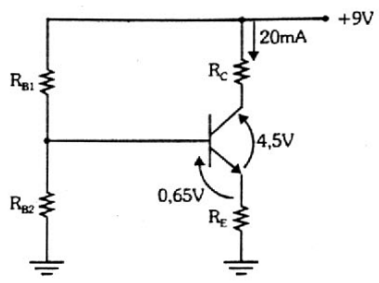
Com esses dois pontos, traça-se a reta de carga sobre a curva característica de saída da configuração EC onde se localizará o ponto quiescente, como mostra a figura.



Reta de carga na configuração EC



Característica de saída do transistor



Circuito de polarização

Cálculo de R_C:

Adotando-se $V_{RE} = V_{CC}/10 = 0,9V$:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - V_{RE}}{I_{CQ}} = \frac{9 - 4,5 - 0,9}{20x10^{-3}} \Rightarrow R_C = 180\Omega$$

Valor comercial adotado:

$R_C = 180\Omega$

Potência de R_C:

$P_{RC} = R_C \cdot I^2_{CQ} = 180x(20x10^{-3})^2 = 72mW$ (1 /8W)

Cálculo de R_{B1} e R_{B2}:

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{20x10^{-3}}{250} \Rightarrow I_{BQ} = 80\mu A$$
$$I_{B2} = 10.I_{BQ} \Rightarrow I_{B2} = 10x80x10^{-6} \Rightarrow I_{B2} = 800\mu A$$
$$I_{B1} = I_{BQ} + I_{B2} = 80x10^{-6} + 800x10^{-6} = 880\mu A$$

Da malha inferior de entrada, tem-se:

$$R_{B2} = \frac{V_{BE} + V_{RE}}{I_{B2}} \Rightarrow R_{B2} = \frac{0,65 + 0,9}{800x10^{-6}} \Rightarrow R_{B2} = 1937\Omega$$

Valor comercial adotado:

$R_{B2} = 2K2\Omega$

Potência de R_{B2}:

$P_{RB2} = R_{B2} \cdot I^2_{B2} = 2,2x10^3 \times (800x10^{-6})^2 = 1,41mW$ (1 /8W)

Da malha formada por V_{cc}, R_{B1}, V_{BE} e V_{RE}, tem-se:

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{RE}}{I_{B1}} \Rightarrow R_{B1} = \frac{9 - 0,65 - 0,9}{880 \times 10^{-6}} \Rightarrow R_{B1} = 8466\Omega$$

Valor comercial adotado:

R_{B1} = 8K2Ω

Potência de R_{B1}:

$P_{RB1} = R_{B1} \cdot I^2_{B1} = 8{,}2x10^3 \times (880x10^{-6})^2 = 6{,}35mW$ (1 /8W)

Cálculo de R_E:

$$I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ} \Rightarrow I_{EQ} = 20x10^{-3} + 80x10^{-6} = 20{,}08mA$$

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_{EQ}} \Rightarrow R_E = \frac{0{,}9}{20{,}08x10^{-3}} \Rightarrow R_E = 44{,}8\Omega$$

Valor comercial adotado:

R_E = 47Ω

Potência de R_E:

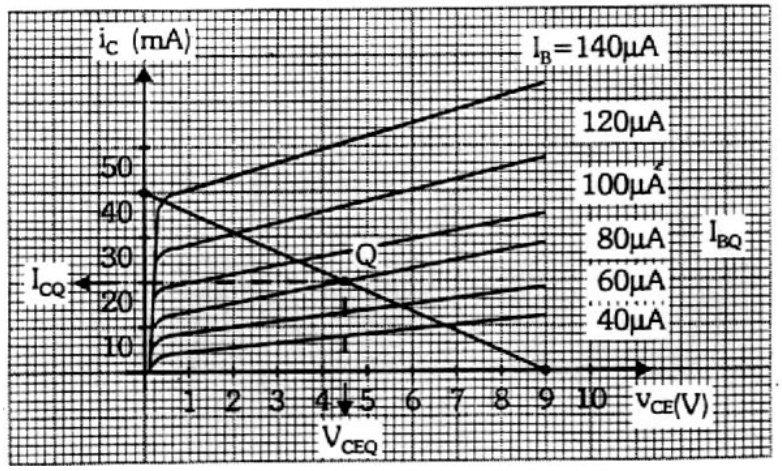
$P_{RE} = R_E \cdot I^2_{EQ} = 47x(20{,}08x10^{-3})^2 = 19mW$ (1 /8W)

Determinação da reta de carga:

$$\text{Para } V_{CEsat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{(R_C + R_E)} \Rightarrow I_{Csat} = \frac{9}{(180 + 47)} = 40mA$$

Para $I_{Ccorte} = 0 \rightarrow I_{CEcorte} = V_{CC} = 9V$

Portanto, a reta de carga com o respectivo ponto quiescente fica como mostrada a seguir:



Uma outra forma de analisar o circuito de polarização EC com divisor de tensão na base, é substituindo-se o divisor de tensão por seu circuito equivalente Thévenin, visto da base do transistor.

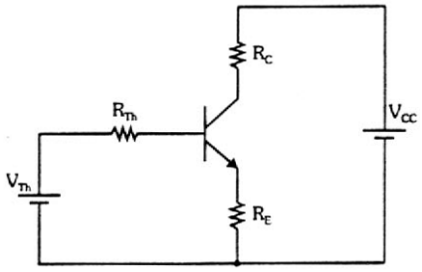
A resistência equivalente de Thévenin (R_{Th}) é obtida curto circuitando-se a fonte V_{CC}. Observando a figura da característica de saida do transistor da pagina 40, V_{CC} em curto coloca os resistores R_{B1} e R_{B2} em paralelo, sendo R_{Th}, determinada por :

$$R_{Th} = \frac{R_{B1} . R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

A tensão equivalente de Thévenin (V_{Th}) é a tensão aplicada pelo divisor de tensão à base do transistor, isto é:

$$V_{Th} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} . V_{CC}$$

Portanto, o circuito de polarização equivalente fica como mostra a figura abaixo.



Circuito de polarização equivalente

Este circuito, com exceção de R_E, é análogo ao primeiro circuito de polarização EC analisado, com duas fontes de alimentação. A diferença é que neste, a Segunda fonte V_{Th} é apenas um artificio usado para o equacionamento de circuito.

Equacionando-se este circuito tem-se:

Malha de entrada:

$R_{Th} . i_B + V_{BE} + R_E . i_E = V_{Th}$

Malha de saída:

$R_C . i_C + V_{CE} + R_E . i_E = V_{CC}$

Pelas equações das malhas, observa-se que existem mais de duas incógnitas.

Este problema é resolvido, adotando-se os seguintes valores práticos:

- $V_{RE} = V_{CC} /10$
- $I_B = I_{B2} /10$

Como se vê, dependendo dos dados conhecidos, a determinação do ponto quiescente pode ser feita graficamente ou analiticamente, sem grandes erros, principalmente porque os transistores não têm parâmetros rígidos que garantam grande precisão.

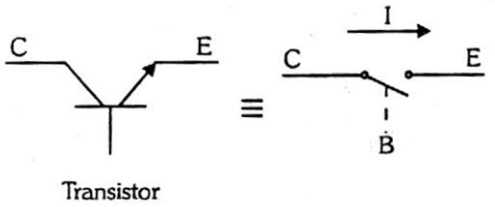
Completar a tabela a seguir (com valores aproximados), para cada uma das situações:

Situação	V_{CB} (V)	V_{BE} (V)	V_{CE} (V)	i_E (mA)	i_C (mA)	i_B (μA)	α	β
I		0,8	6,0					
II	5,3		6,0					
III			6,0			40		
IV			6,0		8			

APLICAÇÕES BÁSICAS DOS TRANSISTORES

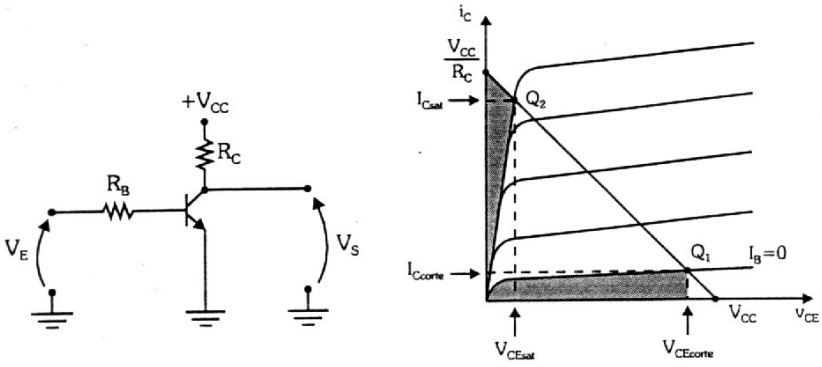
Transistor como chave

Um transistor operando na região de saturação e de corte funciona como uma **chave**, ou seja, como um elemento de **controle on-off**, conduzindo corrente ou não.



Analogia Transitor - Chave

O circuito de polarização utilizado nesta aplicação é o de corrente de base constante com duas fontes de alimentação, sendo que a fonte de polarização da base é, na realidade, o sinal de entrada que controla o transistor, cortando-o (chave aberta) ou saturando-o (chave fechada).



Transistor operando como chave

Para que o transistor opere na região de corte Q_1, é necessário que a tensão de entrada V_E seja menor que V_{BE} de condução. Nesta situação, não circula corrente pelo coletor ($I_{Ccorte} \cong 0$) e a tensão de saída é máxima ($V_S = V_{CEcorte} \cong V_{CC}$).

Para que o transistor opere na região de saturação Q_2, é necessário que a tensão de entrada V_E seja maior que V_{BE} de condução. Nesta situação, a corrente de coletor é máxima (I_{Csat}), dentro de um limite imposto pela polarização, e a tensão de saída é mínima.

Para dimensionar R_C e R_B, utiliza-se a análise das malhas de entrada e de saída.

Malha de entrada:

$V_{RB} = V_E - V_{BE}$

Malha de saída:

$V_{RC} = V_{CC} - V_{CE}$

Assim tem-se :

$$R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{i_B} \quad e \quad R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{i_C}$$

Como o corte do transistor depende apenas da tensão de entrada V_E, o cálculo dos resistores de polarização é feito baseando-se apenas nos parâmetros de saturação.

Um transistor comum, quando saturado, apresenta um V_{CEsat} de aproximadamente 0,3V e um determinado valor mínimo de β (entre 10 e 50) para garantir a saturação. A corrente de coletor de saturação I_{Csat} depende da resistência acoplada ao coletor ou da corrente imposta pelo projeto. Assim, as equações ficam:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_{Csat}} \quad e \quad R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{I_{Bsat}}$$

Malha de entrada:

$V_{RB} = V_E - V_{BEsat}$

Calculando R_B:

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta_{sat}} = \frac{25x10^{-3}}{20} = 1,25mA$$

$$R_B = \frac{V_E - V_{BEsat}}{I_{Bsat}} \Rightarrow R_B = \frac{9 - 0,7}{1,25x10^{-3}} \Rightarrow R_B = 6640\Omega$$

R_B = 6640Ω

Valor comercial adotado:

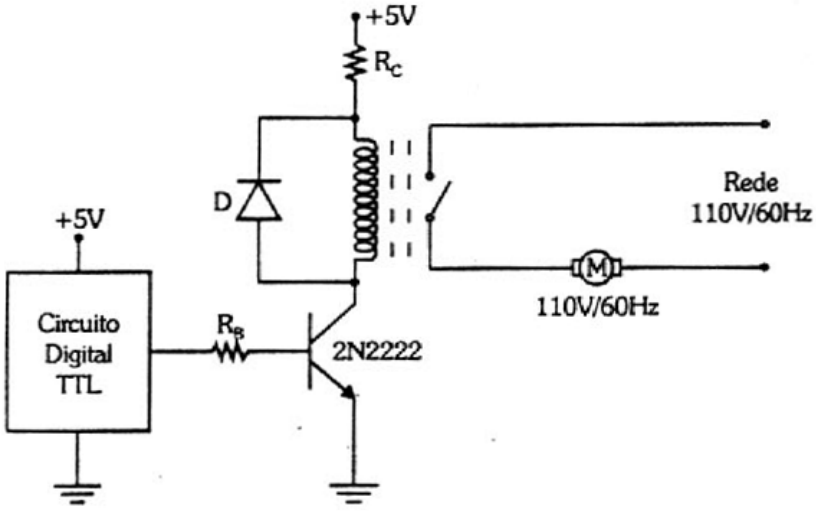
R_B = 6K8Ω

Potência de R_B:

$P_{RB} = R_B \cdot I^2_{Bsat} = 6{,}8x10^3x(1{,}25x10^{-3})^2 = 10{,}625mW$ (1 /8W)

Quando a chave passa para a posição OFF, a entrada é aterrada ($V_E < V_{BE}$), causando o corte de transistor e, conseqüentemente, apagando o LED.

Um circuito digital (TTL) foi projetado para acionar um motor de 110V/60Hz sob determinadas condições. Para tanto, é necessário que um transistor como chave atue sobre um relé, já que nem o circuito digital, nem um transistor podem acionar este motor. O circuito utilizado para este fim está mostrado a seguir:

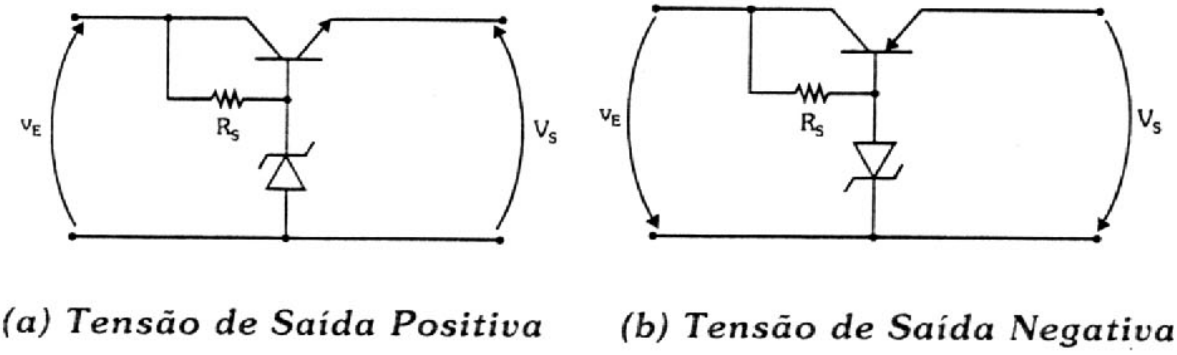


Neste circuito, em série com R_C coloca-se a bobina do relé. Esta bobina, normalmente, apresenta uma resistência DC da ordem de algumas dezenas de Ohm. Por ser tão baixa, o resitor R_C tem a função de limitar a corrente no transistor, para não danificá-lo. O diodo em paralelo com a bobina serve para evitar que o transistor se danifique devido à corrente reversa gerada por ela no chaveamento do relé.

Fonte de tensão estabilizada

Uma outra aplicação para os transistores é na construção de fontes de tensão estabilizadas. Uma fonte de tensão estabilizada ideal é aquela que mantém a tensão de saída constante, independentemente da corrente solicitada pela carga. Na prática, isto só acontece dentro de uma faixa de valores de correntes de saída.

A figura a seguir mostra dois circuitos estabilizadores de tensão, sendo o circuito (a) usado para tensões de saída positiva (com transistor NPN) e o circuito (b) usado para as tensões de saída negativa (como transistor PNP).



(a) Tensão de Saída Positiva *(b) Tensão de Saída Negativa*

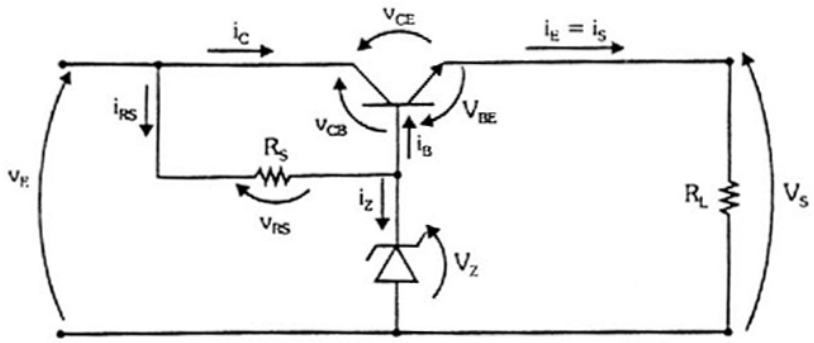
Circuito estabilizadores de tensão

O circuito utilizado para implementar esta fonte é baseado na configuração base comum.

A tensão de entrada V_E pode ser constante (desejando estabilizá-la num valor menor) ou vir de um circuito retificador com filtro, cuja saída apresenta ondulação (ripple).

O diodo zener garante a estabilidade e o transistor permite ampliar a faixa de valores de correntes de saída, sem sobrecarregar o diodo zener. R_S é um resistor limitador de corrente para o diodo zener.

Como os dois circuitos são similares, a análise a seguir terá como referência o circuito estabilizador de tensão positiva, considerando que o mesmo está alimentando uma carga



Análise do circuito estabilizador de tensão

A tensão de saída pode ser determinada pela malha externa e pela malha de saída:

Malha externa: $V_S = V_E - V_{CE}$ (I)
Malha de saída: $V_S = V_Z - V_{BE}$ (II)

Sendo este um circuito estabilizador de tensão, ele deve **compensar** tanto as variações de tensão de entrada V_E, como as variações de corrente de saída i_S (causadas pelas variações na carga R_L).

Pela equação (II), nota-se que a tensão de saída V_S é constante, pois tanto a tensão zener V_Z com a tensão V_{BE} são estáveis. Assim, qualquer variação na carga é compensada pela variação de i_S, mantendo a tensão de saída constante.

No transistor tem-se que:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Desde modo, um aumento na entrada V_E, causa um aumento em V_{CB}. Como V_{BE} é constante , V_{CE} aumenta. Portanto pela equação (I), V_S permanece constante. O mesmo ocorre para diminuição de V_E, ou seja, V_{CE} compensa as variações de tensão na entrada.

Como $V_{CB} = V_{RS}$, as variações de tensão provocam variações na corrente i_{RS}, que são absorvidas pelo diodo zener com variações de i_Z, sem que sua tensão de saída se altere.

Como se vê, as variações na tensão de entrada e na corrente de saída são sempre compensadas pelas variações de V_{CE} e i_Z.

Por outro lado, existem limites máximos e mínimos tanto para V_{CE} como para i_Z, o que limita os valores máximos e mínimos da tensão de entrada e da corrente de saída, para que haja tanto a estabilização da tensão como a proteção do transistor e do diodo zener.

Limitações da tensão de entradas

O **diodo zener** limita a **tensão mínima de entrada** na garantia de regulação (I_{Zm}):

$$V_{Em} = (I_B + I_{Zm}).R_S + V_Z$$

O diodo zener limita a tensão máxima de entrada por sua corrente máxima de sua condução (I_{ZM}):

$$V_{EM} = (I_B + I_{ZM}).R_S + V_Z$$

O transistor limita a tensão mínima de entrada na sua condição de saturação (V_{CEsat}):

$$V_{Em} = V_{CEsat} + V_S$$

O transistor limita a tensão máxima de entrada por sua tensão máxima (V_{CEmax}):

$$V_{EM} = V_{CEmax} + V_S$$

Das tensões mínimas V_{Em} , escolhe-se a maior, e das tensões máximas V_{Em}, escolhe-se a menor.

Limitações impostas pela corrente de saída

A corrente mínima de saída é zero (circuito sem carga) e, neste caso, $I_B = 0$ e $I_Z = I_{RS}$. Portanto, a corrente de saída zero faz com que toda a corrente passe pelo diodo zener, limitando os valores mínimo e máximo de R_S.

$$R_{Sm} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM}} \quad e \quad R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm}}$$

A corrente máxima de saída I_{SM} (carga muito baixa) é limitada pela corrente máxima de coletor do transistor (I_{Cmax}) que por sua vez, depende da potência máxima que o transistor pode dissipar (P_{Cmax}). Considerando $I_s \cong I_c$, tem-se:

$$I_{SM} = I_{Cmax} \quad e \quad P_{Cmax} = (V_{EM} - V_S).I_{SM}$$

As equações anteriores, referentes às limitações do circuito e dos dispositivos, devem ser utilizadas conforme as especificações do projeto e em função dos dispositivos disponíveis ou escolhidos.

Solucionando Problemas

1) Utilizando um transistor BD137, calcule seus resistores de polarização para que ele comande o acionamento de um motor DC de 3V/750mW, a partir de um circuito digital TTL.

Parâmetros do BD137:

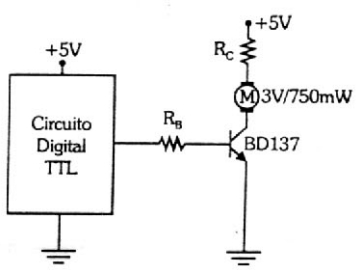
V_{BEsat} = 0,7V

V_{CEsat} = 0,3V

β_{sat} = 40

I_{Cmax} = 1,5A

V_{CEmax} = 60V



2) Deseja-se construir um eliminador de bateria de 7,5 V, a partir de um circuito retificador que fornece em sua saída 20V ± 20%. Este circuito será utilizado para alimentar cargas de no mínimo 20Ω. Tem-se disponível um transistor BD237 e um diodo zener BZW03-C8V2. Determine um valor de R_S que satisfaça essas condições e verifique se o diodo zener e o transistor são adequados para este fim.

Parâmetros do BD237:

V_{BE} = 0,7V

V_{CEmax} = 80V

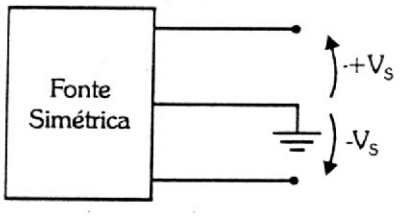
I_{Cmax} = 2A

Parâmetros do BZW03-C8V2:

V_Z = 8,2V

P_{ZM} = 6W

3) Desenhe o circuito de uma fonte de tensão estabilizada com saída simétrica, a partir de um retificador de onda completa em ponte.



O TRANSISTOR COMO COMPARADOR

Introdução

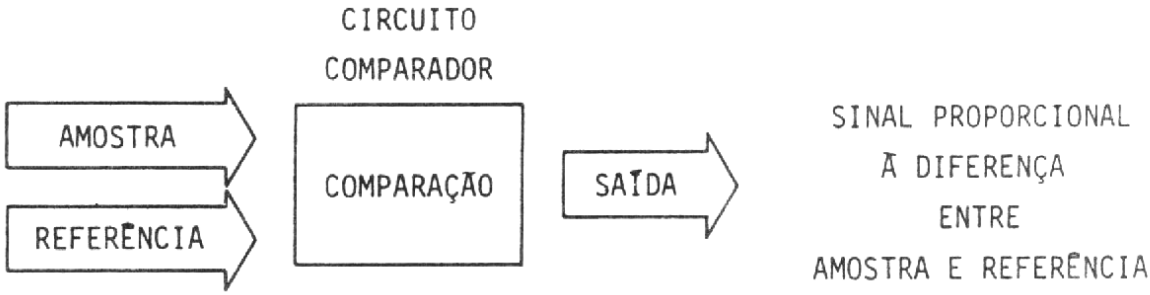
A utilização do transistor como elemento regulador na construção de fontes de alimentação estabilizadas levou a pesquisa de circuitos destinados a melhoria da qualidade dessas fontes.

Um dos circuitos a transistor que possibilitou a melhoria de qualidade das fontes de alimentação foi o comparador.

Este fascículo tratará do circuito comparador a transistor, sua constituição e princípio de funcionamento, visando prepará-lo para compreender o funcionamento das fontes reguladas com comparador.

Transistor como comparador

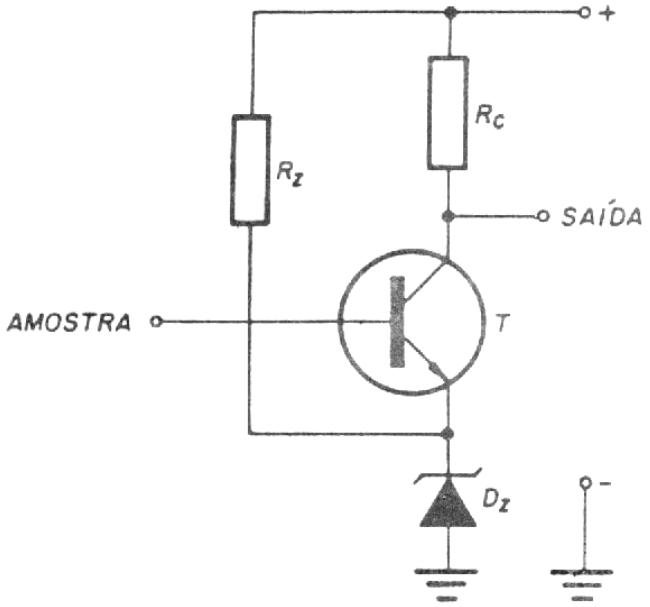
Os comparadores são circuitos eletrônicos que recebem uma amostra de sinal, comparam esta amostra com um valor de referência e produzem, na sua saída, um sinal proporcional à diferença entre amostras e referência.



Os circuitos comparadores são muito utilizados em fontes de alimentação.

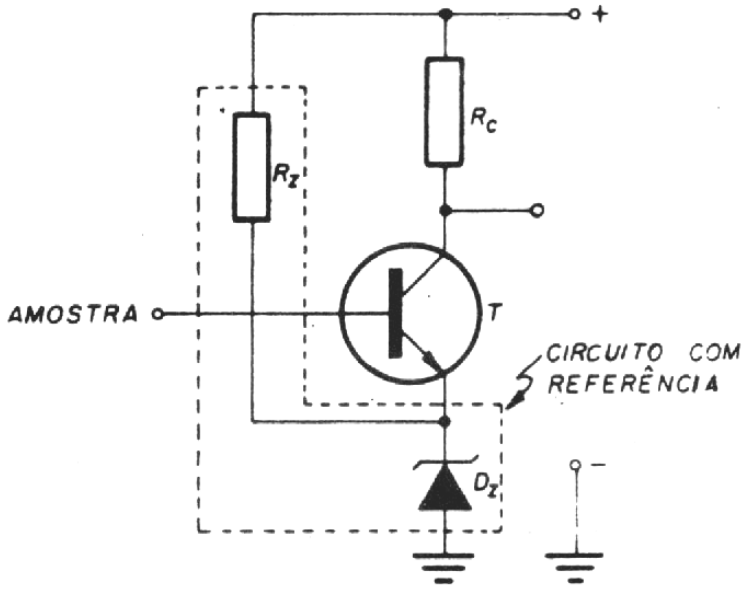
O circuito comparador

Um circuito comparador pode ser constituído por um transistor ligado na configuração emissor comum, conforme mostra a figura.



Referência

A referência necessária para o funcionamento correto dos circuitos comparadores consiste em uma “fonte de tensão” ou “corrente constante”.

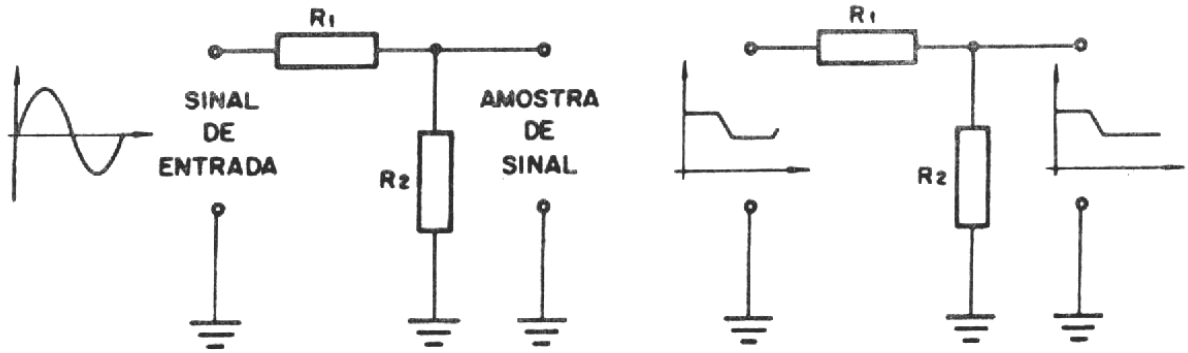


Na figura acima, o diodo zener e o resistor fornecem uma tensão constante ao emissor do transistor. A tensão de emissor é a tensão constante de referência.

Amostra

A amostra é geralmente fornecida ao circuito comparador por um divisor de tensão resistivo.

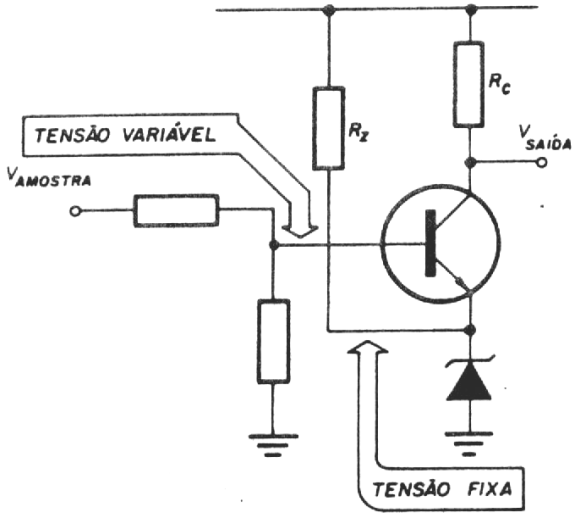
Pela primeira característica de funcionamento do divisor de tensão, a amostra se comporta como uma representação exata de tudo o que acontece na entrada do sinal de amostragem.



Funcionamento

O princípio de funcionamento do circuito baseia-se na variação de tensão base-emissor do transistor.

A tensão do emissor tem sempre o valor fixo de referência, de forma que o V_{BE} do transistor depende fundamentalmente da tensão aplicada à base (amostra).



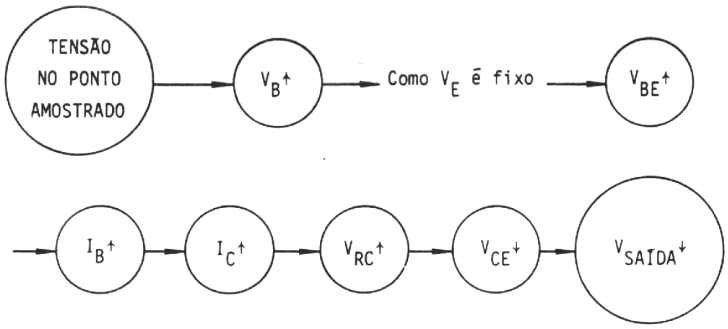
$V_{BE} = V_B - V_E$

$V_{BE} = V_{AMOSTRA} - V_Z$

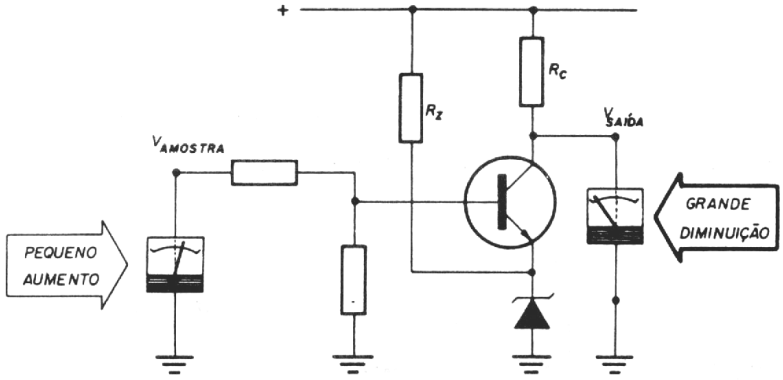
A tensão da base depende do comportamento do sinal onde é retirada a amostra.

A tensão na saída do circuito comparador depende da tensão entre base-emissor do transistor.

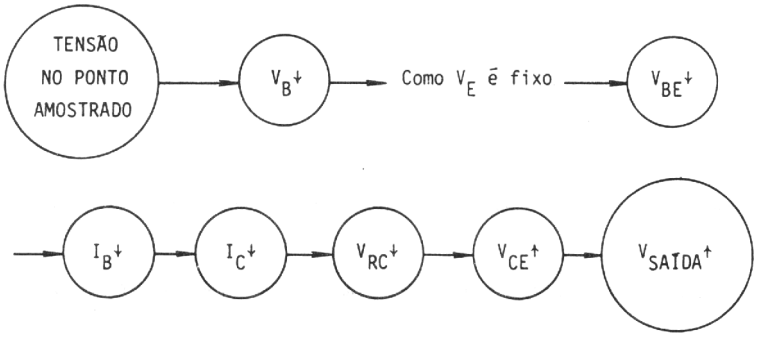
Se a tensão do ponto onde é feita a tomada de amostra sofre um pequeno aumento, tem-se:



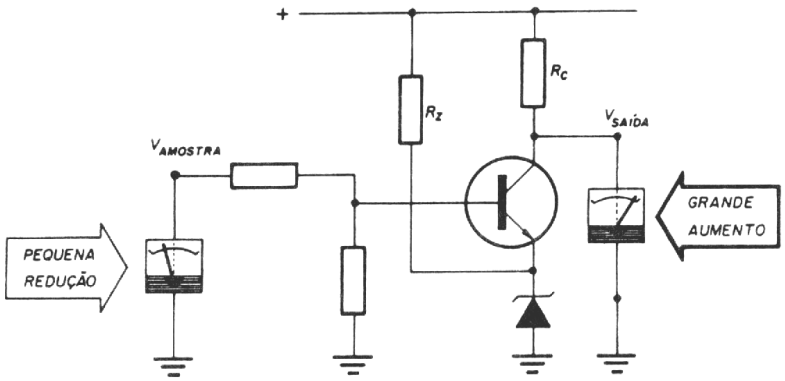
A pequena elevação na tensão amostrada provoca uma redução muito maior na saída do circuito.



A redução na tensão de saída é proporcional ao aumento ocorrido na amostra. Se a tensão no ponto onde é feita a tomada de sinal sofre uma pequena redução, tem-se:



Uma pequena redução na tensão amostrada provoca uma elevação muito maior na saída do circuito:



Conclui-se que o circuito comparador, além de detectar variações no sinal amostrado, fornece na saída uma versão "amplificada" proporcional a esta variação.

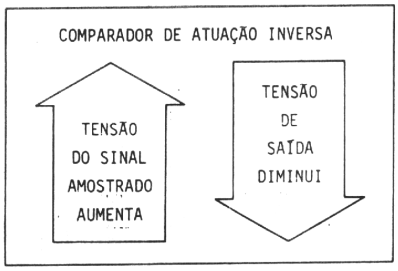
Comparador de atuação INVERSA ou DIRETA

O circuito comparador atua como "amplificador" de tensão contínua, fornecendo na saída uma versão ampliada das mudanças ocorridas no sinal amostrado.

Os comparadores podem ser classificados como sendo de atuação direta ou inversa, dependendo de forma como o sinal de saída se comporta em relação ao sinal amostrado.

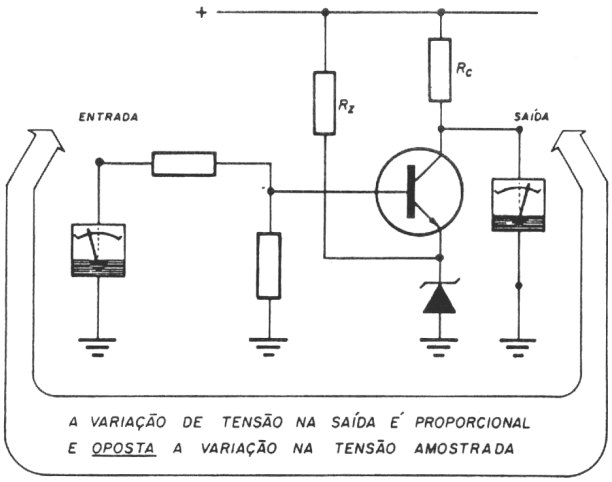
Comparador de atuação inversa

Um circuito comparador pode ser classificado como de "atuação inversa" quando o sinal de saída varia de forma oposta ao sinal amostrado.



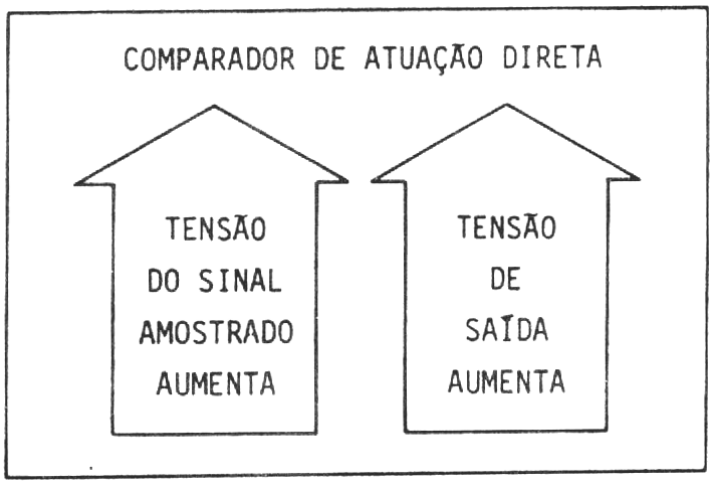
Os circuitos comparadores compostos por apenas um transistor são sempre de atuação inversa.

Tem-se, por exemplo, o circuito comparador utilizado para demonstrar o princípio de funcionamento.

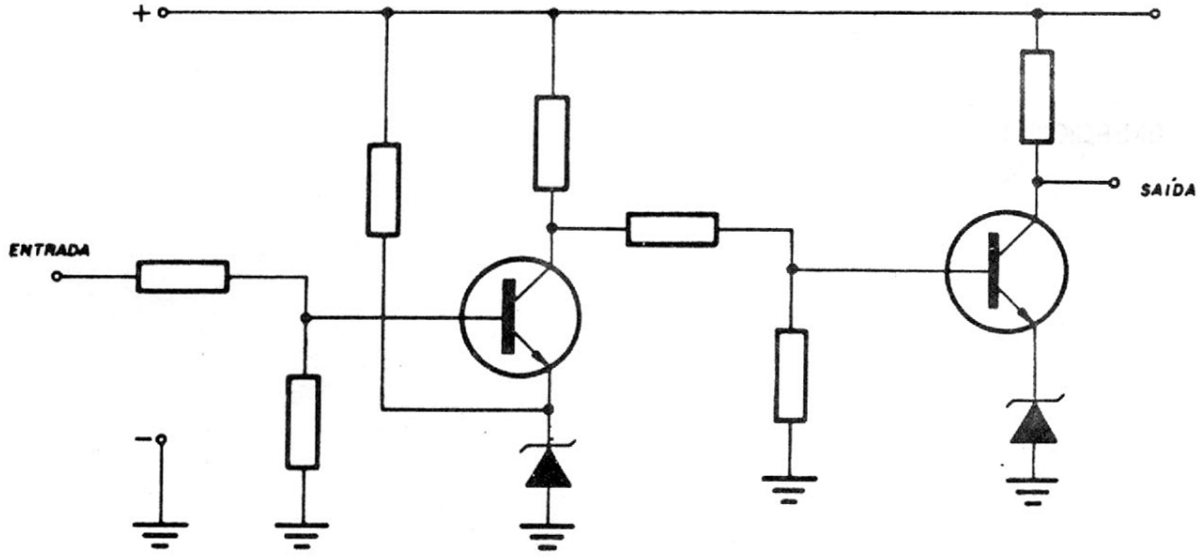


Comparador de atuação direta

O comparator de atuação direta fornece na saída um sinal que varia de forma proporcional e no mesmo sentido que a variação no sinal amostrado.



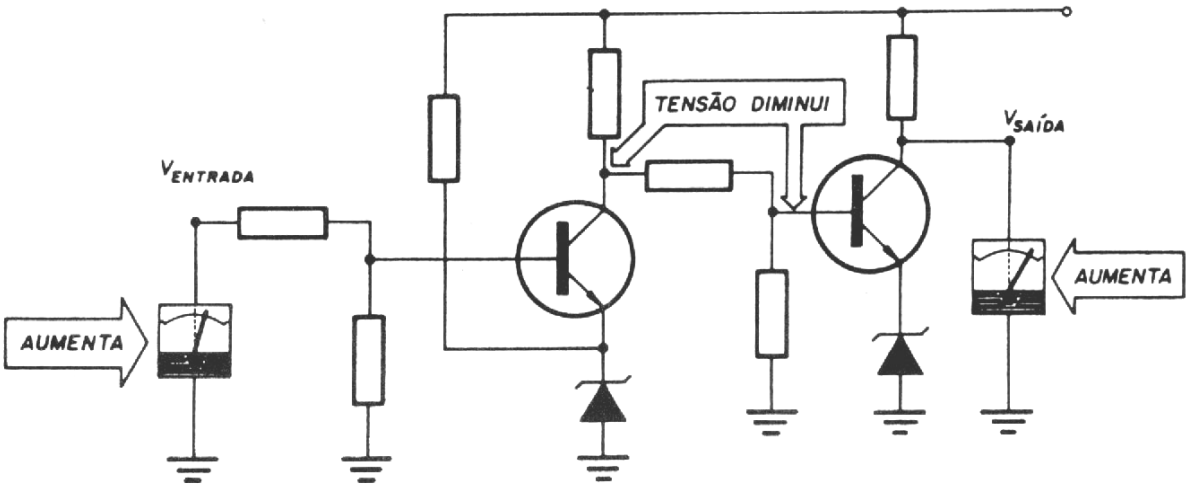
Os comparadores de atuação direta são constituídos, normalmente, por circuitos mais completos. Um dos circuitos comparadores mais simples é mostrado na figura abaixo.



Este comparador de atuação direta é composto por duas partes:

- Um comparador de atuação inversa;
- Um estágio com finalidade de inverter as variações do comparador, entregando na saída um sinal de mesma fase de entrada.

A figura a seguir ilustra a forma como o circuito funciona, quando ocorre um aumento na tensão amostrada.



FONTE REGULADA COM COMPARADOR

Introdução

Este fascículo corresponde a um “fechamento” teórico e prático de uma etapa do curso de eletrônica.

Através do circuito da fonte regulada com comparador serão reunidos, em uma única montagem com aplicação prática, um circuito retificador, o filtro e o estágio regulador de tensão com comparador.

É importante observar como os circuitos são reunidos, como peças de um quebra - cabeça, formando um conjunto único.

O objetivo maior deste fascículo é justamente desenvolver uma habilidade em identificar, num circuito completo, os “pequenos circuitos” que o compõem. Esta habilidade é indispensável àqueles que desejam fazer a manutenção em equipamentos eletrônicos.

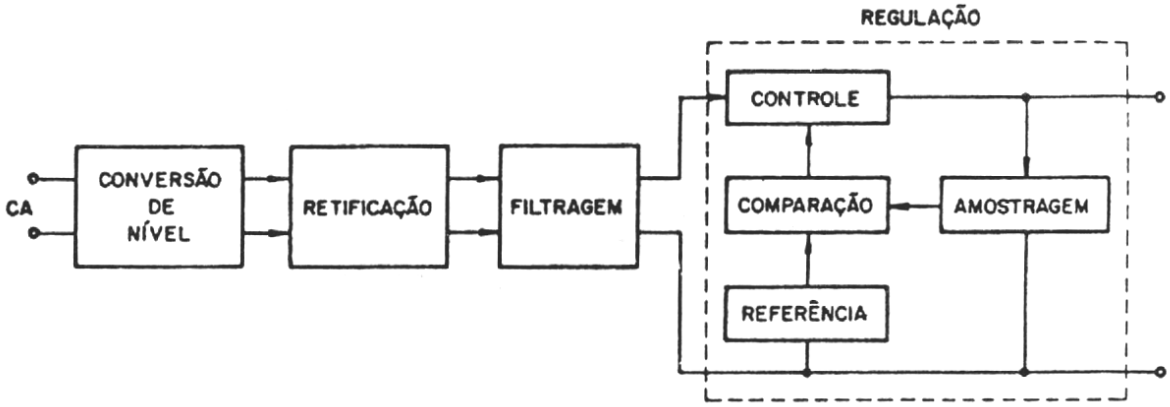
Fonte regulada com comparador

É um circuito eletrônico destinado a fornecer um valor de tensão contínua constante na saída, embora as correntes de carga e a tensão de entrada variem dento de um limite pré-estabelecido.

As fontes reguladas com comparador são uma versão “mais elaborada” dos circuitos reguladores convencionais, sendo utilizados para alimentação de equipamentos que necessitem uma grande estabilidade nas tensões de funcionamento.

Digrama de blocos

A figura a seguir representa o diagrama em bloco completo de uma fonte regulada com comparador.



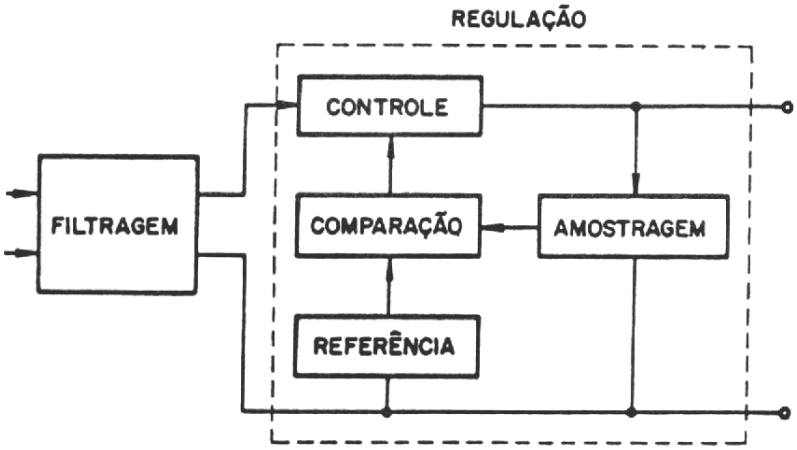
Os três primeiros blocos representam a transformação de tensão alternada da rede em tensão contínua filtrada.

A conversão de nível é feita para que se obtenha o valor de tensão alternada necessário na retificação, a partir das tensões padronizadas das redes elétricas (110V, 220V ou 380V).

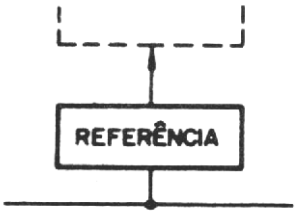
A retificação consiste na transformação da tensão alternada em contínua pulsante, através dos diodos, ligados de forma a fornecer meia-onda ou onda completa.

A filtragem tem por objetivo aproximar a forma de tensão de saída de retificação de uma tensão contínua pura.

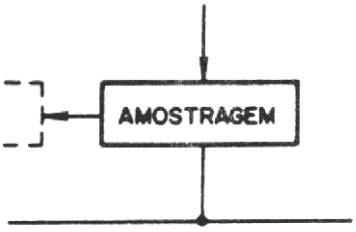
Os blocos restantes, que constituem o circuito regulador de tensão propriamente dito, são discutidos a seguir, tomando como base a figura seguinte.



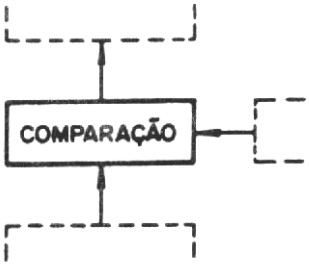
O bloco denominado “referência” representa o componente ou circuito que tem por finalidade fornecer a tensão de referência necessária para o funcionamento do comparador.



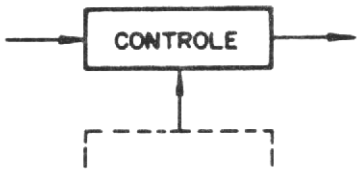
A amostragem tem por finalidade fornecer uma parcela da tensão de saída necessária para o funcionamento do comparador.



O bloco denominado “comparação” representa o circuito que recebe as tensões de amostra e referência, comparando-os e apresentando na saída uma tensão proporcional a diferença entre as duas entradas. O circuito comparador, em geral, atua também como amplificador da diferença entre amostra e referência.



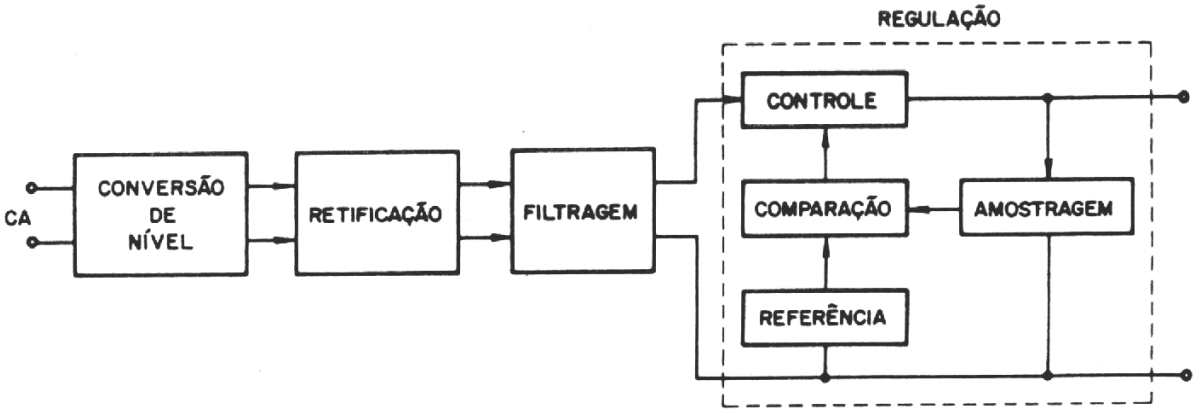
O bloco denominado “controle” representa o transistor regulador, que recebe na base a tensão de saída da fonte.

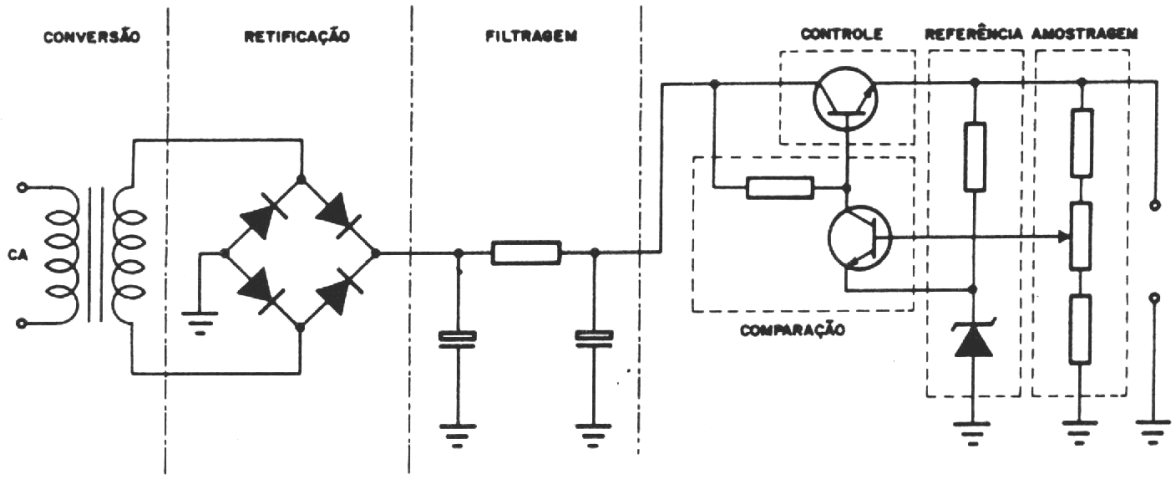


A compreensão da finalidade de cada um dos blocos, bem como a identificação de cada um dos seus componentes é muito importante, na medida em que facilita a manutenção e reparo da fonte regulada.

Circuito de fonte regulada

As figuras seguintes apresentam o diagrama de blocos e o circuito real completo de uma fonte regulada com comparador, com os diversos blocos identificados.

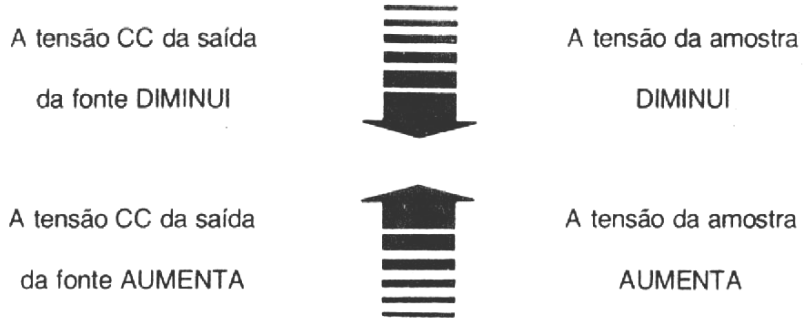




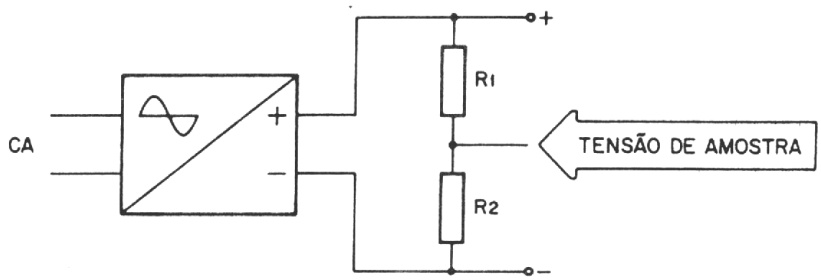
Amostragem

Em um circuito de fonte de alimentação o “sinal” de saída é a tensão CC fornecida.

A “amostra” nas fontes de alimentação é um valor de tensão, obtido de saída, que se comporta com a tensão de saída de saída, ou seja:

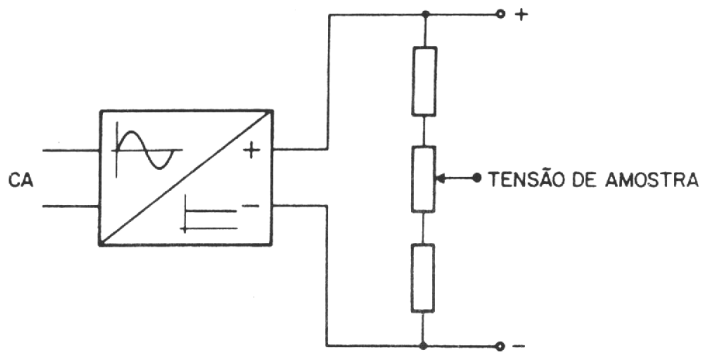


Nas fontes de alimentação utiliza-se um divisor de tensão para obter a tensão de amostra (figura abaixo).



A tensão fornecida pelo divisor se caracteriza perfeitamente como “amostra”, sendo uma parcela de tensão de saída e se comportando como esta.

Como em muitas ocasiões se fazem necessários ajustes no valor de tensão das amostras, usualmente os divisores de tensão dispõem de um potenciômetro ou trimpot (figura abaixo).

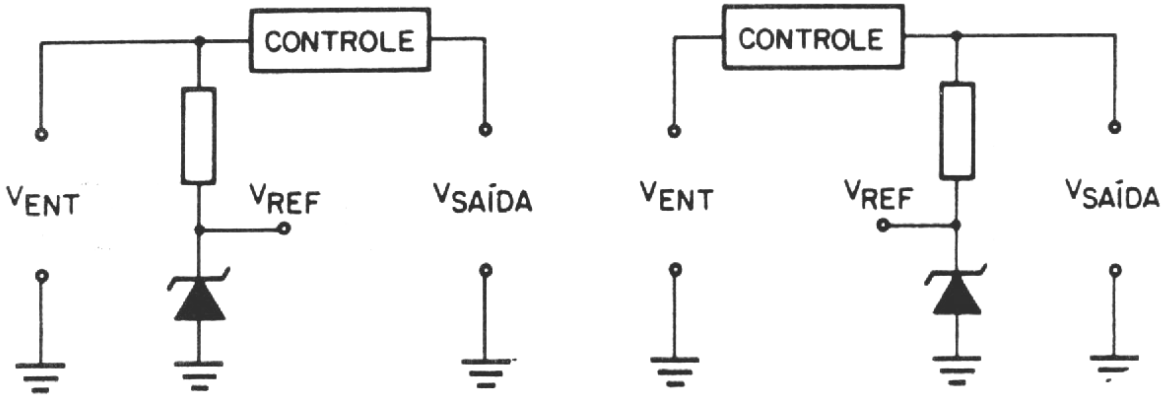


O trimpot permite que a tensão de saída da fonte seja ajustável dentro de certos limites.

Referência

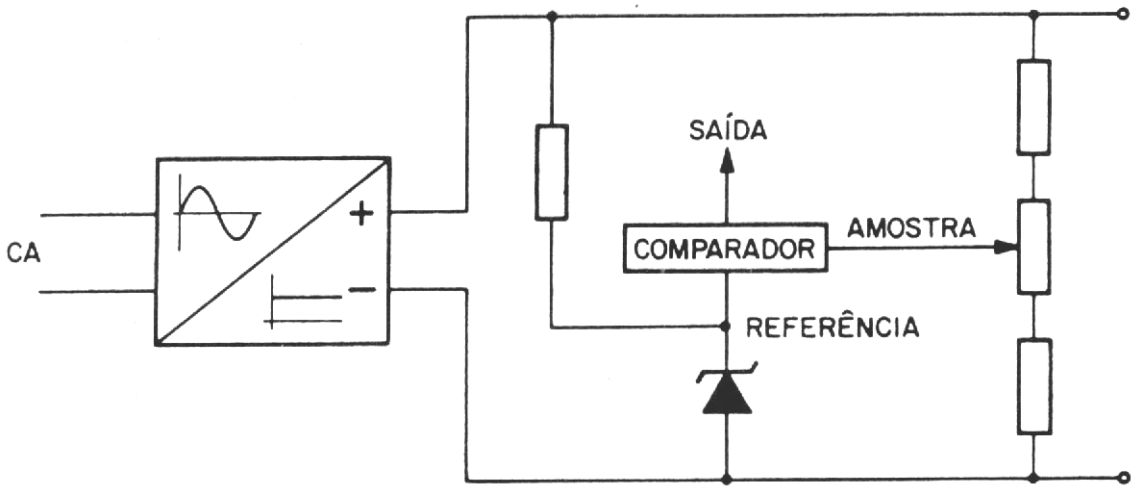
Nos circuitos de fontes de alimentação a referência consiste de valor de tensão constante, independente das variações de carga ou de entrada. Utiliza-se, neste caso, o diodo zener como fornecedor da tensão de referência.

A figura a seguir mostra duas formas de obtenção de tensão de referência.



Comparação

Nos circuitos d fontes de alimentação o bloco do circuito comparador está posicionado conforme mostra a figura.



A função da comparação pode ser executada por apenas um transistor ou por circuitos mais elaborados.